



**António Manuel Gomes Godinho**

Licenciado em Ciências da Engenharia Electrotécnica e de Computadores

## **Localização de Defeitos em Linhas Aéreas de Transporte e Distribuição de Energia**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins, Prof. Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade  
Nova Lisboa

Júri

Presidente: Professor Doutor Luís Augusto Bica Gomes de Oliveira  
Arguente: Professor Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro, 2019**



## **Localização de Defeitos em Linhas Aéreas de Transporte e Distribuição de Energia**

Copyright © António Manuel Gomes Godinho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Para vocês, Maria do Rosário e Belmiro Silva,  
pois a Inspiração é tão grande como a Saudade...*



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, **Professor Doutor João Martins** por me dar a oportunidade de realizar esta tese. Obrigado por toda a disponibilidade, orientação e ainda por todos os ensinamentos transmitidos que serão com certeza úteis para a minha futura vida profissional.

Ao **Engenheiro Rui Jorge**, à **Engenheira Sara Costa** e ao **Engenheiro João Peres** por toda a disponibilidade e pela oportunidade de desenvolver esta tese em parceria com a EFACEC.

À minha **Mãe**, que é para mim uma fonte de dedicação e entrega que se esforça ao máximo todos os dias, por quem tenho imensa admiração. Tentarei retribuir tudo o que me deste.

Ao meu **Pai**, um orgulho por tudo o que alcançaste e por me ensinares inúmeras lições ao longo da vida, que espero guardar para passar as gerações futuras.

Ao meu **irmão João**, que eu vejo como um modelo a seguir, uma fonte de inspiração de quem tenho imenso orgulho. Sabes que serás sempre "*o meu maninho*".

À minha **Inês**, por estar sempre ao meu lado a apoiar-me seja nos bons como nos menos bons momentos, tornando este percurso tão especial. Obrigado por seres uma fonte de inspiração. Espero poder retribuir a felicidade que me dás.

À minha **Família**, por sempre ter acreditado nas minhas capacidades e por estarem sempre presentes.

Aos meus amigos de faculdade, principalmente ao **David Taranta**, **Tomás Rocha**, **Bruno Duarte** e **Filipa Santos** por estes 5 anos fantásticos de noitadas de estudo, mas também de alguma festa que tornaram este percurso um pouco mais fácil.

Aos meus amigos de longa data, principalmente ao **Francisco Santos**, ao **Daniel Silva**, à **Beatriz Correia** e ao **Bernardo Baptista** pelo apoio incondicional de tantos anos.

A todos aqueles que fizeram parte deste percurso académico e que foram importantes nesta caminhada.





## RESUMO

---

Com o constante aumento do consumo energético, foi necessário um aumento do número de linhas que transportam energia até aos consumidores finais. Estas linhas estão expostas à ocorrência de defeitos de variadas naturezas. Estes defeitos podem ter consequências económicas, tanto para os produtores como para os consumidores de energia. É fundamental determinar a localização do defeito, o mais exacta possível, para que a linha volte a ficar operacional em tempo útil.

Actualmente os métodos de localização de defeitos, podem classificar-se em três grupos, métodos baseados em fasores, métodos baseados em altas frequências e métodos baseados em ondas viajantes .

A utilização de métodos baseados em fasores é o mais comum nos dias de hoje, no entanto, este tipo de métodos apresenta algumas limitações e algum grau de imprecisão.

No presente trabalho demonstra-se que os resultados obtidos através da aplicação de métodos baseados em ondas viajantes são mais preciso, que os resultados apresentados na literatura para os métodos baseados em fasores.

Esta dissertação apresenta os resultados da aplicação dos sub-métodos nos dois extremos e num só extremo baseados em ondas viajantes . Estes sub-métodos foram aplicados em três casos de estudo, considerados típicos (linha simples, linhas paralelas e linha em T), apresenta-se também o estudo da influência da frequência de amostragem na obtenção de resultados referentes aos sub-métodos utilizados.

**Palavras-chave:** Linhas de Transporte de Energia; Localização de Defeitos; Método Ondas Viajantes nos Dois Extremos; Método Ondas Viajantes num Só Extremo.

---



## ABSTRACT

---

As the continuous increase in energy consumption, it has been necessary to increase the number of lines that carry energy to end consumers. These lines are exposed to the occurrence of defects of various natures. These defects can have economic consequences for both energy producers and consumers. It is essential to determine the defect location as accurately as possible so that the line will be operational again in a timely manner.

Currently, fault location methods can be classified into three groups, phasor based methods, high frequency based methods and traveling wave based methods.

The use of phasor-based methods is the most common today, however, these methods have some limitations and some degree of inaccuracy.

The present work demonstrates that the results of the application of traveling wave based methods is more accurate than the results presented in the literature for phasor based methods.

This dissertation presents the results of applying the double-ended and single-ended traveling waves based.

This submethods were applied in three case studies, considered typical (single line, parallel lines and T-line), It is also presented the study of the influence of the sampling frequency in obtaining results regarding the sub-methods used.

**Keywords:** Power Transmission Lines; Defects Location; Double-ended Travelling Waves Methods; Single-ended Travelling Waves Methods

---



# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>Siglas</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Motivação . . . . .	1
1.2 Objectivos . . . . .	2
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	4
<b>2 Conhecimento Prévio</b>	<b>5</b>
2.1 Modelo da Linha . . . . .	5
2.2 Defeito na Linha de Transmissão . . . . .	9
2.2.1 Tipos de Defeitos . . . . .	9
2.2.2 Consequências dos Defeitos . . . . .	11
2.3 Métodos de Localização de Defeitos . . . . .	12
<b>3 Localização de Defeitos Baseada em Ondas Viajantes</b>	<b>17</b>
3.1 Método Baseado em Ondas Viajantes . . . . .	17
3.1.1 Método das Ondas Viajantes nos Dois Extremos . . . . .	17
3.1.2 Método das Ondas Viajantes num Só Extremos . . . . .	20
<b>4 Casos de Estudo</b>	<b>27</b>
4.1 Modelo e Características da Linha . . . . .	27
4.2 Linha Simples . . . . .	28
4.3 Linhas em Paralelo . . . . .	29
4.4 Linha em T . . . . .	30
4.5 Influência da Frequência de Amostragem . . . . .	32
<b>5 Resultados e Discussão</b>	<b>35</b>
5.1 Influência da Frequência de Amostragem . . . . .	35

5.2	Linha Simples . . . . .	40
5.3	Linhas em Paralelo . . . . .	42
5.4	Linhas em T . . . . .	44
5.5	Discussão . . . . .	47
5.5.1	Linha Simples . . . . .	47
5.5.2	Linhas em Paralelo . . . . .	47
5.5.3	Linha em T . . . . .	48
5.5.4	Comparação com a Literatura . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>51</b>
6.1	Síntese do Trabalho . . . . .	51
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	52
	<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>
<b>I</b>	<b>Linha Simples</b>	<b>57</b>
<b>II</b>	<b>Linhas em Paralelo</b>	<b>63</b>
<b>III</b>	<b>Linha em T</b>	<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Linha simples; (a) linha com dupla geração; (b) linha com uma geração e uma carga . . . . .	2
1.2	Linhas paralelas; (a) linha com dupla geração; (b) linha com uma geração e uma carga . . . . .	3
1.3	Linha em T; (a) linha com tripla geração; (b) linha com duas gerações e uma carga . . . . .	3
2.1	Esquema dos parâmetros distribuídos da linha (adaptado de [8]) . . . . .	6
2.2	Defeito linha para terra; (a) linha a, (b) linha b, (c) linha c, (adaptado de [12]) . . . . .	9
2.3	Defeito linha-linha para terra; (a) linhas a e b, (b) linhas b e c, (c) linhas a e c, (adaptado de [12]) . . . . .	10
2.4	Defeito linha-linha; (a) linhas a e b, (b) linhas b e c, (c) linhas a e c, (adaptado de [12]) . . . . .	10
2.5	Defeito linha-linha-linha para terra (adaptado de [12]) . . . . .	10
2.6	Tipos de defeitos (adaptado de [14]) . . . . .	11
2.7	Modelo da linha simplificado para o método num só extremo baseado na impedância (adaptado de [1]) . . . . .	13
2.8	Modelo da linha simplificado para o método nos dois extremos baseado na impedância (adaptado de [1]) . . . . .	13
3.1	Diagrama de Bewley explicativo do método OV nos dois extremos . . . . .	18
3.2	Exemplo do gráfico da identificação do tempo de chegada da OV através da corrente no terminal S . . . . .	19
3.3	Exemplo do gráfico da identificação do tempo de chegada da OV através da corrente no terminal R . . . . .	19
3.4	Fluxograma do método OV nos dois extremos . . . . .	20
3.5	Diagramas de Bewley explicativo do método OV num só extremo . . . . .	21
3.6	Gráficos da corrente e tensão no primeiro meio período pós-defeito . . . . .	22
3.7	Decomposição de um sinal em coeficientes de aproximação ( $A_1$ ) e coeficientes de detalhe ( $D_1$ ) ( adaptado de [30] ) . . . . .	23
3.8	Filtros do db4 . . . . .	23
3.9	Exemplo dos gráficos da transformada de Karrenbauer, dos coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhe para a tensão . . . . .	24

3.10	Exemplo dos gráficos da transformada de Karrenbauer, coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhe para a corrente . . . . .	24
3.11	Exemplo do gráfico coeficientes de detalhe para a tensão . . . . .	25
3.12	Exemplo do gráfico de coeficientes de detalhe para a corrente . . . . .	25
3.13	Fluxograma do método OV num só extremo . . . . .	26
4.1	Representação da linha simples em estudo . . . . .	28
4.2	Modelo do <i>Simulink</i> para o método OV nos dois extremos para a linha simples	29
4.3	Modelo do <i>Simulink</i> para o método OV num só extremo para a linha simples	29
4.4	Representação através de blocos do modelo das linhas em paralelo em estudo	29
4.5	Modelo do <i>Simulink</i> para o método OV nos dois extremos para duas linhas em paralelo . . . . .	30
4.6	Modelo do <i>Simulink</i> para o método OV num só extremo para duas linhas em paralelo . . . . .	30
4.7	Modelo representativo das dimensões de cada troço usado para a obtenção de resultados da linha em T . . . . .	31
4.8	Modelo do <i>Simulink</i> utilizado para simular uma linha em T . . . . .	32
5.1	Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 96.7 km para o método OV nos dois extremos . . . . .	37
5.2	Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 96.7 km para o método OV num só extremo . . . . .	37
5.3	Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 14 km para o método OV nos dois extremos . . . . .	39
5.4	Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 14 km para o método OV num só extremo . . . . .	39
5.5	Defeito ocorridos no troço S-T . . . . .	44
5.6	Defeito ocorridos no troço T-R . . . . .	45
5.7	Defeito ocorridos no troço K-T . . . . .	46



## LISTA DE TABELAS

2.1	Tipos de defeitos, probabilidade de ocorrência e severidade (adaptado de [15])	11
4.1	Parâmetros distribuídos das linhas em estudo . . . . .	27
5.1	Resultados do método OV nos dois extremos numa linha de 96,7 km . . . . .	36
5.2	Resultados do método OV num só extremo numa linha de 96,7 km . . . . .	36
5.3	Resultados do método OV nos dois extremos numa linha de 14 km . . . . .	38
5.4	Resultados do método OV num só extremo numa linha de 14 km . . . . .	38
5.5	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT . . . . .	40
5.6	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLT . . . . .	40
5.7	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT . . . . .	41
5.8	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo linha-terra . . . . .	41
5.9	Resultados obtidos através do método referente aos dois extremos para duas linhas em paralelo de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT .	42
5.10	Resultados obtidos através do método referente aos dois extremos para duas linhas em paralelo geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLT . . .	42
5.11	Resultados obtidos através do método referente a um só extremo para duas linhas em paralelo de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT .	43
5.12	Resultados obtidos através do método referente a um só extremo para duas linhas em paralelo geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLT . . .	43
5.13	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLT no troço S-T . . . . .	44
5.14	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLT no troço S-T . . . . .	44
5.15	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLT no troço T-R . . . . .	45
5.16	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLT no troço T-R . . . . .	45

5.17	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLT no troço K-T . . . . .	46
5.18	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLT no troço K-T . . . . .	47
I.1	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	57
I.2	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	57
I.3	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	58
I.4	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	58
I.5	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	58
I.6	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	59
I.7	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	59
I.8	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	59
I.9	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	60
I.10	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	60
I.11	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	60
I.12	Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	61
II.1	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	63
II.2	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	63
II.3	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	64
II.4	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	64
II.5	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	64

II.6	Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	65
II.7	Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	65
II.8	Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT . . . . .	65
II.9	Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	66
II.10	Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL . . . . .	66
II.11	Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	66
II.12	Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLLT . . . . .	67
III.1	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLT no troço S-T . . . . .	69
III.2	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLT no troço S-T . . . . .	69
III.3	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLT no troço T-R . . . . .	70
III.4	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLT no troço T-R . . . . .	70
III.5	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLLT no troço K-T . . . . .	70
III.6	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLT no troço K-T . . . . .	71
III.7	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLL no troço S-T . . . . .	71
III.8	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLL no troço S-T . . . . .	71
III.9	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLL no troço T-R . . . . .	72
III.10	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLL no troço T-R . . . . .	72
III.11	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLL no troço K-T . . . . .	72
III.12	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLL no troço K-T . . . . .	73
III.13	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLLT no troço S-T . . . . .	73

III.14	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLLT no troço S-T . . . . .	73
III.15	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLLT no troço T-R . . . . .	74
III.16	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLLT no troço T-R . . . . .	74
III.17	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLLLT no troço K-T . . . . .	74
III.18	Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLLT no troço K-T . . . . .	75

## SIGLAS

DLT	Defeito Linha-Terra.
DLL	Defeito Linha-Linha.
DLLT	Defeito Linha-Linha-Terra.
DLLLT	Defeito Linha-Linha-Linha-Terra.
EMTP	Electromagnetic Transient Program.
IEC	International Electrotechnical Commission/Comissão Electrotécnica Internacional.
REE	Rede de Energia Eléctrica.
OV	Ondas Viajantes.



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Constante de atenuação.
$\beta$	Constante de fase.
$\gamma$	Constante de propagação.
$\Theta_i$	Fase inicial da corrente.
$\Theta_u$	Fase inicial da tensão.
$\lambda$	Comprimento de onda.
$\omega$	Frequência.
$C$	Capacidade.
$C_0$	Capacitância sequência zero.
$C_1$	Capacitância sequência positiva.
$C_x, C_y$	Constantes reais arbitrárias.
$F_s$	Frequência de amostragem.
$G$	Condutância.
$I, i$	Corrente.
$I_0$	Corrente modo zero.
$I_\alpha$	Corrente modo alpha.
$I_\beta$	Corrente modo beta.
$I_A$	Corrente da fase A.
$I_B$	Corrente da fase B.
$I_C$	Corrente da fase C.
$I^I$	Corrente incidente.
$I^R$	Corrente reflectida.
$j$	Unidade imaginária.
$L$	Coefficiente de auto-indução.
$L_0$	Indutância sequência zero.
$L_1$	Indutância sequência positiva.
$LL$	Comprimento total da linha.
$L_{KT}$	Comprimento do troço K-T.
$L_{ST}$	Comprimento do troço S-T.

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

$L_{TR}$	Comprimento do troço T-R.
$M$	Local onde ocorreu a falha.
$P_1$	posição referente à chegada da primeira onda pós-falta ao terminal.
$P_2$	posição referente à chegada da primeira onda reflectida no local da falta ao terminal.
$PV$	Velocidade de propagação da onda viajante.
$R$	Resistência.
$R_0$	Resistência sequência zero.
$R_1$	Resistência sequência positiva.
$R_W$	Resistência característica da onda.
$\Re$	Parte real de um número complexo.
$T$	Período de onda.
$t$	Tempo.
$t_0$	Instante em que a falha ocorreu.
$t_K$	Instante em que a onda viajante chega ao terminal K.
$t_R$	Instante em que a onda viajante chega ao terminal R.
$t_S$	Instante em que a onda viajante chega ao terminal S.
$TWLPT$	Tempo de propagação das ondas viajantes.
$U, u$	Tensão.
$U_0$	Tensão Corrente modo zero.
$U_\alpha$	Tensão modo alpha.
$U_\beta$	Tensão modo beta.
$U_A$	Tensão da fase A.
$U_B$	Tensão da fase B.
$U_C$	Tensão da fase C.
$U^I$	Tensão incidente.
$U^R$	Tensão reflectida.
$x$	Coordenada de posição.
$X_W$	Reactância característica.
$\tilde{Y}_T$	Admitância complexa da linha.
$Z_0$	Impedância sequência zero.
$Z_1$	Impedância sequência zero.
$\tilde{Z}_L$	Impedância complexa da linha.
$Z_W$	Impedância característica.



## INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento e Motivação

A rede eléctrica de energia (REE) pode ser dividida em geração, transmissão e distribuição de energia eléctrica aos seus variados consumidores. Com o aumento do consumo de energia eléctrica, houve um aumento do número de linhas. Essas linhas estão frequentemente sujeitas a defeitos devido ao contacto de animais ou árvores com a linha, a descargas atmosféricas em dias de tempestade ou mesmo devido a erro humano.

É necessária a localização rápida e precisa de um defeito e de modo a que a equipa de manutenção intervenha o mais rapidamente possível no local onde este ocorreu e de maneira a que a linha afectada seja reposta em serviço para que os clientes sejam afectados o mínimo possível.

Hoje em dia, a possível prevenção de um defeito, a localização rápida e exacta do mesmo pode fazer com que se poupe muito dinheiro a nível do mercado energético, pelo que é do maior interesse das empresas intervenientes na REE a utilização de um método preciso na localização de defeitos.

Devido a essa enorme importância que tem a localização do local onde ocorreu o defeito, ao longo de vários anos foram sendo desenvolvidos vários métodos de localização de defeito. Actualmente estes métodos podem ser divididos em três grandes grupos de métodos de localização de defeitos: métodos baseados em alta frequência; métodos baseados em fasores e métodos baseado em ondas viajantes (OV) [1].

Muitos dos métodos apresentados pelos dois primeiros grupos apresentam muitas limitações, tais como: dificuldades de implementação em linhas híbridas [2], necessidade de saber previamente o tipo de defeito ocorrido [3] e pouca precisão relativamente ao cálculo da localização do defeito [4]. Já os métodos baseados em OV apresentam soluções para as limitações apresentadas pelos grupos anterior e uma melhoria na precisão [4].

Quando ocorre um defeito, este determina a formação de ondas viajantes, que se propagam para ambas as direcções da linha a uma velocidade próxima da velocidade da luz. Através da análise das propriedades físicas dessas ondas viajantes, pós defeito, é possível localizar com bastante precisão a localização efectiva onde ocorreu o defeito [5].

Este trabalho foi feito em colaboração com a EFACEC.

### 1.2 Objectivos

No seguimento do problema apresentado, o objectivo central a que esta tese se propõe é a análise dos métodos OV na localização o mais exacta possível de um defeito que ocorra numa REE e a sua eventual aplicabilidade prática.

Outro dos objectivos desta tese é desenvolver e comparar o método OV nos dois extremos com o método OV num só extremo.

Estes métodos diferenciam-se entre si essencialmente através da localização dos relés, isto é o sub-método nos dois extremos na sua aplicação utiliza dois relés, um em cada extremidade da linha, o sub-método num só extremos utiliza apenas relés numa extremidade da linha.

Através da aplicação destes dois sub-métodos será efectuado: um estudo do impacto da frequência de amostragem na obtenção de resultado; a comparação entre os dois sub-métodos; comparação da precisão dos resultados obtidos e a precisão dos resultados típicos obtidos na literatura e ainda a precisão dos mesmo em comparação com os resultados apresentados pelos métodos baseados em fasores pela literatura.

Para a obtenção dos resultados dos dois métodos a que este documento se propõe a desenvolver, os mesmos serão testados em três casos de estudo, considerados típicos. Nos três casos de estudo haverá a simulação de uma linha onde todos os terminais terão ligado um elemento de geração e uma linha onde existirá um elemento de carga num dos terminais e os restantes serão elementos de geração.

Os três casos de estudo são apresentados nas figuras seguintes.

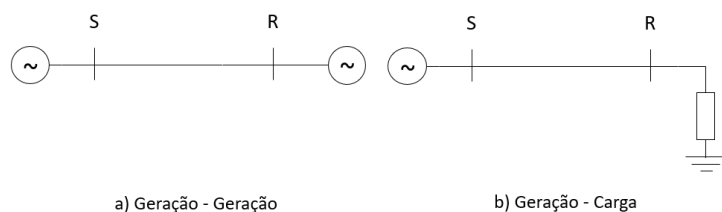


Figura 1.1: Linha simples; (a) linha com dupla geração; (b) linha com uma geração e uma carga

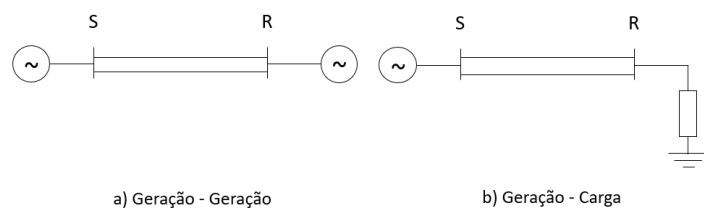


Figura 1.2: Linhas paralelas; (a) linha com dupla geração; (b) linha com uma geração e uma carga

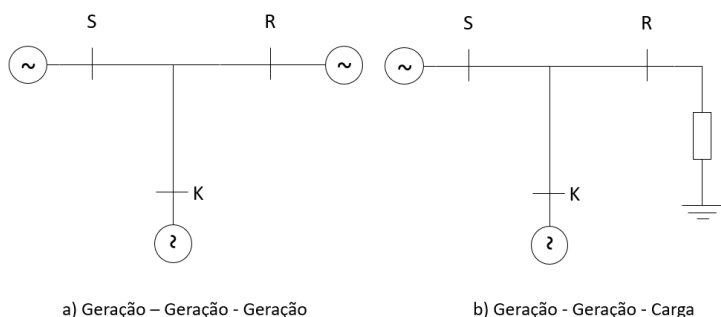


Figura 1.3: Linha em T; (a) linha com tripla geração; (b) linha com duas gerações e uma carga

O primeiro caso, apresentado na figura 1.1, pode ser considerado a situação base de teste inicial dos dois métodos. Neste caso a onda viajante, pós defeito, apenas apresenta reflexões nos próprios terminais da linha e no local onde ocorreu o defeito, o que facilita a detecção de reflexões que ocorram.

O segundo caso de estudo, apresentado na figura 1.2, apresenta mais complexidade que o primeiro, uma vez que as reflexões, que são fundamentais para a aplicação do método OV num só extremos, também são transmitidas através da linha paralela à linha onde ocorreu o defeito, podendo num caso extremo em que as duas linhas que se encontram em paralelo poderão ter parâmetros e/ou tamanhos diferente, dificultando a detecção do local exacto onde ocorreu o defeito.

Por último, no terceiro caso, apresentado na figura 1.3, há a introdução, a meio da linha, de um troço mais curto com uma geração que introduz reflexões, dificultando assim a localização do local onde ocorreu o defeito. Para este tipo de linha é necessário uma localização prévia do troço onde ocorreu o defeito, quer isto dizer, que só tendo conhecimento, antes da aplicação dos métodos em estudo, em que troço da linha em T é que ocorreu o defeito e que será possível a localização do mesmo.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Este documento está dividido em seis capítulos, organizados em diversas secções e subsecções para melhor compreensão do mesmo.

No Capítulo 1 apresenta-se o enquadramento e motivação, os objectivos e a estrutura do documento.

No Capítulo 2 é apresentada toda a teoria sobre o modelo da linha, tipos de defeitos e suas consequências, assim como os métodos de detecção existentes.

No Capítulo 3 descreve detalhadamente o desenvolvimento e aplicação do algoritmo dos métodos OV nos dois extremos e OV num só extremos.

O Capítulo 4 apresenta os casos de estudo considerados para a aplicação dos métodos apresentados no capítulo anterior bem como os parâmetros utilizados em cada um dos casos.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados tanto da influência da frequência de amostragem na obtenção de resultados, como dos três casos de estudo para o tipo de defeitos mais comum. No final é apresentado uma discussão sobre os resultados obtidos.

O Capítulo 6 é apresentado uma síntese do trabalho desenvolvido e sugestões de futuros trabalhos a realizar a partir desta dissertação.

## CONHECIMENTO PRÉVIO

### 2.1 Modelo da Linha

Uma linha de transporte de energia pode ser representada por modelos de parâmetros concentrados ou parâmetros distribuídos. Para esta dissertação foi escolhida a utilização dos parâmetros distribuídos uma vez que o modelo é baseado no método de ondas viajantes de Bergeron e usado pelo EMTP (*Electromagnetic Transient Program*), um software especializado em analisar os transitórios electromagnéticos e problemas de isolamento associados [6].

Neste modelo a linha possui dois tipos de parâmetros, os transversais e os longitudinais, em que ambos estão distribuídos de forma uniforme ao longo do seu comprimento e dependem da frequência a que a linha se encontra, estes parâmetros representam-se por [7]:

- Os parâmetros transversais:
  - $G \left( \Omega^{-1} \cdot m^{-1} \right)$  Condutância transversal entre condutores, por unidade de comprimento.
  - $C \left( F \cdot m^{-1} \right)$  Capacidade entre condutores, por unidade de comprimento.
- Os parâmetros longitudinais:
  - $R \left( \Omega \cdot m^{-1} \right)$  Resistência longitudinal total dos dois condutores, por unidade de comprimento.
  - $L \left( H \cdot m^{-1} \right)$  Coeficiente de auto-indução total da linha, por unidade de comprimento.

Todas as equações apresentadas nesta secção são referentes a uma linha de dois condutores.

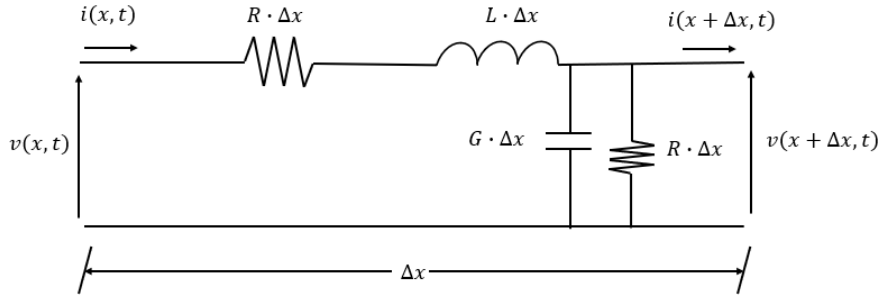


Figura 2.1: Esquema dos parâmetros distribuídos da linha (adaptado de [8])

A figura 2.1 apresenta o esquema dos parâmetros distribuídos. Os quatro parâmetros apresentados na imagem são definidos pela geometria dos condutores, pelas propriedades dos seus materiais e pelas propriedades do dielétrico que os envolve. Nas linhas aéreas devido ao ar ser um isolante perfeito, a condutância transversal entre condutores é nula.

A linha é percorrida por uma onda de tensão,  $u(x, t)$  e uma onda de corrente,  $i(x, t)$ , ambas sinusoidais no tempo, com uma dada frequência  $\omega$  e com uma dada fase inicial  $\Theta$  dependente da coordenada  $x$ , sendo essa tensão e corrente podem ser definidas respectivamente pelas equações (2.1) e (2.3).

$$u(x, t) = U(x) \cos(\omega t + \Theta_u(x)) = \mathbf{R}\{\bar{U}(x)e^{j\omega t}\} \quad (2.1)$$

Onde,

$$\bar{U}(x) = U(x)e^{j\Theta_u(x)} \quad (2.2)$$

$$i(x, t) = I(x) \cos(\omega t + \Theta_i(x)) = \mathbf{R}\{\bar{I}(x)e^{j\omega t}\} \quad (2.3)$$

Onde,

$$\bar{I}(x) = I(x)e^{j\Theta_i(x)} \quad (2.4)$$

O sistema de equações (2.5) descreve a evolução espaço-temporal das grandezas que representam os parâmetros distribuídos da linha.

$$\begin{cases} \frac{d\bar{U}(x)}{dx} = \bar{Z}_L \bar{I}(x) \\ \frac{d\bar{I}(x)}{dx} = \bar{Y}_T \bar{U}(x) \end{cases} \quad (2.5)$$

No sistema de equações anterior são utilizadas duas grandezas, a impedância longitudinal, por unidade de comprimento  $\bar{Z}_L$  e a admitância transversal, por unidade de comprimento  $\bar{Y}_T$ , que são definidas para linhas a trabalharem em regime sinusoidal de frequência  $\omega$  pelo sistema de equações (2.6).

$$\begin{cases} \bar{Z}_L = R + j\omega L & (\Omega \cdot m^{-1}) \\ \bar{Y}_T = G + j\omega C & (S \cdot m^{-1}) \end{cases} \quad (2.6)$$

As equações complexas (2.2) e (2.4) podem ser satisfeitas pelo sistema de equações (2.7).

$$\begin{cases} \bar{U}(x) = \bar{U}_0 e^{\bar{\gamma}x} \\ \bar{I}(x) = \frac{\bar{U}(x)}{\bar{Z}_W} \end{cases} \quad (2.7)$$

Se substituirmos o sistema de equações (2.7) no sistemas de equações (2.5) obtemos o sistema de equações (2.8).

$$\begin{cases} \bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}_L \bar{Y}_T} & (m^{-1}) \\ \bar{Z}_W = \sqrt{\frac{\bar{Z}_L}{\bar{Y}_T}} & (\Omega) \end{cases} \quad (2.8)$$

O sistema de equações apresenta duas grandezas complexas: a constante de propagação,  $\bar{\gamma}$ , e a impedância característica de onda,  $\bar{Z}_W$ . Ambas as grandezas podem ser reescritas respectivamente pelas equações (2.9) e (2.10).

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta \quad (2.9)$$

A equação (2.9) mostra que a constante de propagação é composta por uma parte real, a constante de atenuação,  $\alpha$ , cuja as unidades são  $Neper \cdot m^{-1}$ , e por uma parte imaginária, a constante de fase,  $\beta$ , cuja as unidades são  $rad \cdot m^{-1}$ .

$$\bar{Z}_W = R_W + jX_W \quad (2.10)$$

A equação (2.10) mostra que a impedância característica da onda é composta por uma parte real, a resistência característica de onda,  $R_W$ , cuja a unidade é  $\Omega$ , e por uma parte imaginária, a reactância característica de onda,  $X_W$ , cuja a unidade é  $\Omega$ .

Uma linha trabalha a uma determinada frequência  $\omega$ , como podemos observar pela equação (2.11), onde  $T$  é o período da sinusóide, e com um determinado comprimento de onda, equação (2.12), onde  $PV$  é a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas, Verifica-se que numa linha com perdas, a constante de fase  $\beta$  pode ser escrita também pela equação (2.13).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.11)$$

$$\lambda = PV \times T \quad (2.12)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.13)$$

Numa linha sem perdas, como é o caso das linhas utilizadas nesta dissertação a velocidade de propagação das ondas é dada pela equação (2.14).

$$PV = \frac{1}{\sqrt{L \times C}} \quad (2.14)$$

Derivando o 1º membro da equação (2.5), substituindo na equação obtida o 2º membro dessa mesma equação e resolvendo a equação linear obtém-se a equação (2.15).

$$\bar{U}(x) = C_x e^{\gamma x} + C_y e^{-\gamma x}, \quad \text{com } C_x \text{ e } C_y \in \mathbb{C} \quad (2.15)$$

Se derivarmos a equação (2.15) duas vezes em ordem a  $x$  e rearrajando de modo obter-se a corrente, obtém-se a equação (2.16) .

$$\bar{I}(x) = \frac{C_x}{Z_W} e^{\gamma x} - \frac{C_y}{Z_W} e^{-\gamma x}, \quad \text{com } C_x \text{ e } C_y \in \mathbb{C} \quad (2.16)$$

É então possível obter as equações complexas da tensão e da corrente em função de  $x$ , representadas respectivamente nas equações (2.17) e (2.18).

$$\bar{U}(x) = \frac{U(x) + Z_W I(x)}{2} e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} + \frac{U(x) - Z_W I(x)}{2} e^{-\alpha x} e^{-j(\omega t + \beta x)} \quad (2.17)$$

$$\bar{I}(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{U(x)}{Z_W} + I(x) \right) e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} - \frac{1}{2} \left( \frac{U(x)}{Z_W} - I(x) \right) e^{-\alpha x} e^{-j(\omega t + \beta x)} \quad (2.18)$$

É possível então observar que a equação (2.17) que expressa a tensão da onda viajante em função de  $x$ , é composta pela soma de duas ondas: a onda reflectida, equação (2.19) e a onda incidente, equação (2.20).

$$\bar{U}^R(x) = \frac{U(x) + Z_W I(x)}{2} e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (2.19)$$

$$\bar{U}^I(x) = \frac{U(x) - Z_W I(x)}{2} e^{-\alpha x} e^{-j(\omega t + \beta x)} \quad (2.20)$$

É possível então observar que a equação (2.18) que expressa a corrente da onda viajante em função de  $x$ , é composta pela soma de duas ondas: a onda reflectida, equação (2.21) e a onda incidente, equação (2.22).

$$\bar{I}^R(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{U(x)}{Z_W} + I(x) \right) e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (2.21)$$

$$\bar{I}^I(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{U(x)}{Z_W} - I(x) \right) e^{-\alpha x} e^{-j(\omega t + \beta x)} \quad (2.22)$$



## 2.2 Defeito na Linha de Transmissão

Por definição, um defeito numa linha de transmissão é uma anormalidade que envolve ou resulta na falha do circuito do sistema primário ou de um elemento deste, ou ainda de um equipamento ou mecanismo; requerendo uma desconexão imediata através do disparo dos disjuntores apropriados [9].

É praticamente impossível evitar defeitos nas linhas de transmissão, como a ocorrência de defeitos provocados por condições atmosféricas adversas, onde podem haver descargas atmosféricas a provocar sobretensões elevadas.

É extremamente importante evitar e reduzir a possibilidade de defeitos. Para isso é necessário saber que tipo de defeitos existem e quais as consequências que esses defeitos podem provocar.

### 2.2.1 Tipos de Defeitos

Os defeitos na linha de transmissão podem ser divididos em três tipos:

- Defeito por circuito aberto
- Defeito por curto-circuito
- Defeito combinado

Circuito aberto, também conhecido por avaria em série, tal como é definido pelo *International Electrotechnical Commission*/Comissão Electrotécnica Internacional (IEC/CEI) [10], ocorre quando cada uma das três fases tem impedâncias diferentes. Este defeito pode ser causado pela interrupção de uma ou duas fases.

Curto-circuito, tal como é definido pelo IEC/CEI [11], ocorre quando existe fluxo de corrente entre duas ou mais fases ou entre as fases e a terra, podendo ser dividido em dois subtipos:

- Defeitos assimétricos, onde existe uma assimetria entre o valor da corrente das fases do sistema. Existem três tipos de defeito assimétricos:
  - Defeito linha para terra (DLT):

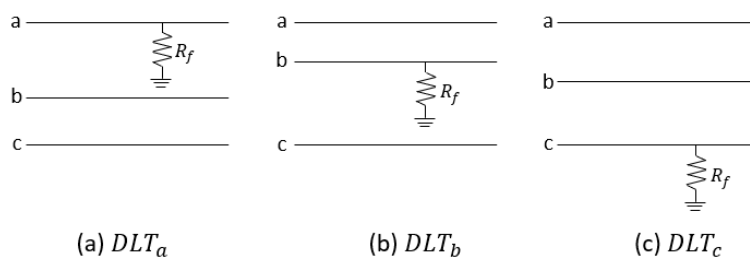


Figura 2.2: Defeito linha para terra; (a) linha a, (b) linha b, (c) linha c, (adaptado de [12])

- Defeito linha-linha para terra (DLLT):

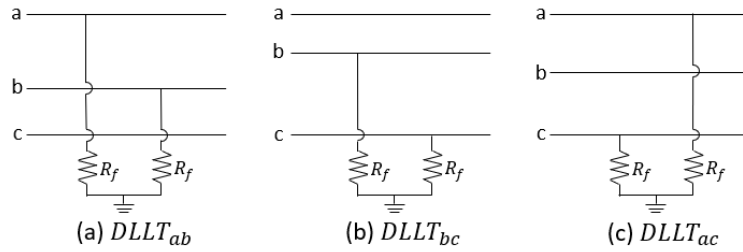


Figura 2.3: Defeito linha-linha para terra; (a) linhas a e b, (b) linhas b e c, (c) linhas a e c, (adaptado de [12])

- Defeito linha-linha (DLL):

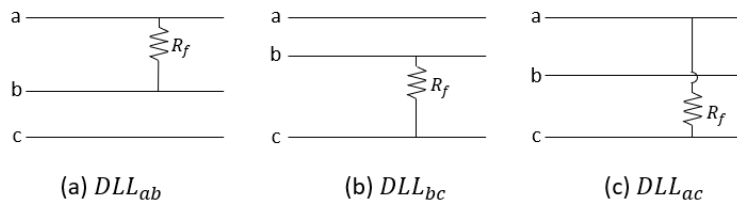


Figura 2.4: Defeito linha-linha; (a) linhas a e b, (b) linhas b e c, (c) linhas a e c, (adaptado de [12])

- Defeitos simétricos, onde apesar do defeito as três fases continuam equilibradas. Existem dois tipos de defeitos simétricos:
  - Defeito curto-circuito trifásico
  - Defeito linha-linha-linha para terra (DLLLLT):

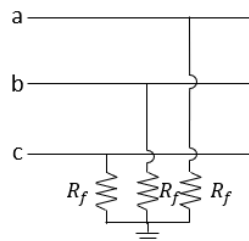


Figura 2.5: Defeito linha-linha-linha para terra (adaptado de [12])

Defeito combinado, tal como é definido pelo IEC/CEI [13], é a ocorrência de um defeito em série e de um defeito em curto-circuito simultaneamente.

Na figura 2.6 é apresentado um esquema dos tipos de defeitos que existem na linha de transmissão.

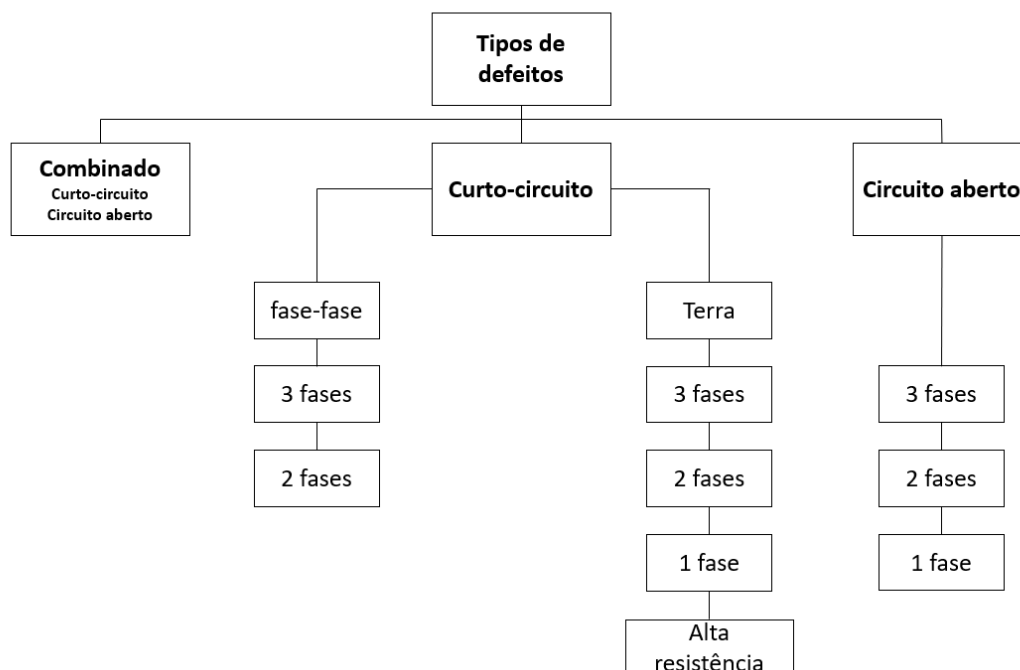


Figura 2.6: Tipos de defeitos (adaptado de [14])

No estudo [15] é apresentada a tabela 2.1, onde se pode observar que os defeitos DLT são o tipo de defeito mais comum, no entanto apresentam uma severidade muito baixa. Já o oposto ocorre com os defeitos do tipo DLLLT, que apesar de ser bastante rara a sua ocorrência, apresentam uma severidade bastante elevada.

Tabela 2.1: Tipos de defeitos, probabilidade de ocorrência e severidade (adaptado de [15])

Tipos de defeitos	Símbolo	Ocorrência (%)	Severidade
Linha - Terra	DLT	75-80	Muito pouco severo
Linha - Linha	DLL	10-15	Pouco severo
Linha - Linha - Terra	DLLT	5-10	Severo
Linha - Linha - Linha - Terra	DLLLT	2-5	Muito severo

### 2.2.2 Consequências dos Defeitos

De modo a minimizar os efeitos de um defeito na REE é usual adoptar o critério de segurança n-1, este critério consiste na continuidade do funcionamento da rede sem que haja prejuízo para os consumidores, mesmo que um elemento da rede deixe de funcionar. No entanto, mesmo com a aplicação deste critério, em casos mais graves podem existir consequências graves provocadas por defeitos.

As consequências dos defeitos podem ser agrupadas em quatro grupos [16]:

- **Consequências ocultas:** defeitos que não têm impacto directo, mas que podem provocar falhas múltiplas e com possíveis consequências catastróficas.
- **Consequências ambientais e de segurança:** defeitos que têm consequências ao nível da segurança das pessoas, podendo provocar feridos ou mortos. Este tipo de defeito pode ter também consequências ao nível ambiental, podendo violar padrões ambientais definidos a nível nacional ou internacional.
- **Consequências operacionais:** defeitos que afectam a produção e a qualidade do produto ou que acarretam custos operacionais e custos directos para a correcção da deficiência.
- **Consequências não operacionais:** defeitos que não têm consequências ao nível da segurança nem da produção, no entanto acarretam custos para corrigir o defeito.

### 2.3 Métodos de Localização de Defeitos

Existem vários métodos reportados na literatura para a localização de defeitos, os mesmo foram sendo desenvolvidos e estudados de modo a melhorar a rapidez e eficácia para a reparação da linha no local correto. Os tipos de métodos usados dependem do tipo de medições que são feitas.

Existem três famílias de métodos de localização de defeitos [1] [17]:

- **Métodos baseados em fasores:** Estes métodos usam a relação entre os fasores de corrente e tensão para localizarem o defeito; é o tipo de método mais utilizado devido à sua simplicidade.
- **Métodos baseados em alta frequência:** Este tipo de método é baseado na recolha de informação de alta frequência de corrente e tensão, sendo usados dois tipos de abordagem, um no domínio da frequência e outro no domínio do tempo.
- **Métodos baseados em ondas viajantes:** Quando ocorre um defeito em qualquer ponto da linha, a mesma provoca uma onda que se propaga para ambos os lados da linha, formando uma onda incidente e outra reflectida; através da análise do tempo de propagação é possível obter a localização do defeito.

Como foi referido anteriormente, a família de métodos baseados em fasores é a mais utilizada; sendo comumente apelidados de métodos de localização de defeito baseados na impedância.

Estes métodos têm como base o cálculo da impedância equivalente a partir de um fasor de corrente e tensão da harmónica principal (da sua amplitude e ângulo) [1].

Devido à sua facilidade de implementação foram desenvolvidos vários algoritmos usando a localização do defeito baseados na impedância; estes sub-métodos podem ser divididos em métodos referentes a um só extremo e métodos referentes aos dois extremos.

Os principais métodos baseados na impedância num só extremo são: método da reactância simples, método de Takagi, método de Takagi modificado, método de Eriksson e método Novosel *et al.* e os principais métodos baseados na impedância nos dois extremos são: método síncrono, método assíncrono e método assíncrono usando apenas a corrente [18].

Os métodos baseados na impedância num só extremo consistem na estimativa do equivalente da impedância de defeito,  $Z_f$  através de relés localizados apenas num ponto da linha, figura 2.7. Esta impedância resultante combinada com modelo de distribuição da linha (tipologia, impedância da linha, etc) e com o modelo de cargas permite estimar como é que a tensão e a corrente se propagam ao longo da linha e assim identificar o local do defeito, tal como mostra a equação (2.23) [1].

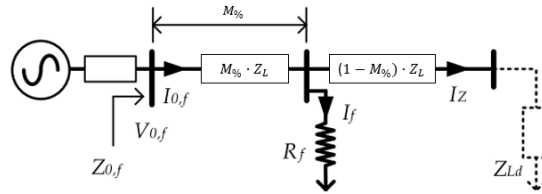


Figura 2.7: Modelo da linha simplificado para o método num só extremo baseado na impedância (adaptado de [1])

$$V_{0,f} = M_{\%0} \cdot Z_L \cdot I_{0,f} + R_f \cdot I_f \quad (2.23)$$

Onde,  $M_{\%0}$  é a distancia em valor relativo ao local do defeito,  $Z_L$  é a impedância da linha,  $R_f$  é a resistência de defeito e  $I_f$  é a corrente de defeito.

Os métodos baseados na impedância nos dois extremos usam relés em dois pontos da linha possibilitando assim a utilização do sistema de equações (2.24) onde a tensão é comum e sendo assim possível estimar o local onde ocorreu o defeito, figura 2.8. Nestes métodos os valores da impedância de defeito acabam por não serem tão críticos como são para o método referentes a um só extremo [1].

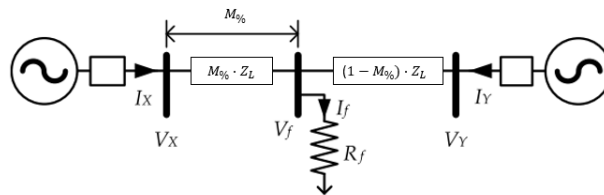


Figura 2.8: Modelo da linha simplificado para o método nos dois extremos baseado na impedância (adaptado de [1])

$$\begin{cases} V_X = M_{\%} \cdot Z_L \cdot I_X + V_f \\ V_Y = (1 - M_{\%}) \cdot Z_L \cdot I_Y + V_f \end{cases} \quad (2.24)$$

Onde,  $M_{\%}$  é a distancia em valor relativo ao local do defeito,  $Z_L$  é a impedância da linha e  $V_f$  é a tensão de defeito.

Estes métodos apesar de serem de fácil implementação apresentam várias debilidades. Entre elas destacam-se: a necessidade de identificação prévia do tipo de defeito que ocorreu, de modo a calcular a impedância de sequência positiva ( $Z_1$ ) [3]; a impossibilidade de aplicação em linhas híbridas [19] [2] e o facto de alguns dos métodos apresentarem erros superiores a 10 % [4].

A utilização dos métodos baseados na impedância apresentam os seguintes problemas relativamente ao seu uso em linhas híbridas [4]:

- $Z_1$  por metro é diferente em linhas aéreas e em linhas subterrâneas.
- A razão  $Z_0/Z_1$  é diferente em linhas aéreas e em linhas subterrâneas, o que afecta o cálculo da localização do defeito em métodos que usam apenas uma extremidade, em defeitos onde haja ligação à terra.
- A impedância sequência zero ( $Z_0$ ) para cabos subterrâneos varia não linearmente com a corrente de defeito.
- $Z_0$  para cabos subterrâneos depende de inúmeros factores o que torna bastante difícil o cálculo exacto no método de localização.

Os factores que mais comumente afectam a precisão dos métodos baseados na impedância são os seguintes [4]:

- O rácio dos transformadores de tensão e dos transformadores de corrente.
- Ao se usar relés e disjuntores rápidos pode causar erros por transitório que por sua vez causaram erros na medição dos fasores nos dispositivos de medição de defeitos.
- Imprecisão nos dados de impedância e comprimento da linha devido à variância ao causado pelo clima na  $Z_0$ .
- Impacto da resistência de defeito nos métodos de extremidade única.
- Impacto das mudanças na resistência de defeito.
- Impacto da corrente de carga da linha.
- No caso dos métodos em que se usa medidores nos dois extremos da linha existe uma imprecisão criada pela dessincronização de relógio entre os medidores dos dois extremos.

Os métodos baseados em alta frequência podem utilizar uma abordagem no domínio da frequência, como são os casos apresentados nos artigos [20] e [21] ou no domínio do tempo como é o caso apresentado no artigo [22].

Estes fazem a detecção e classificação de defeitos comparando a mudança de sinal de potência instantânea das três fases calculado nas duas extremidades de uma linha de transmissão usando amostras de tensão e corrente sincronizadas no tempo [20] [21].

Estes métodos para linhas de transmissão curtas usa o modelo de parâmetros concentrado, onde a equação (2.25) é utilizada para estimar o local onde ocorreu o defeito [21].

$$M = \frac{-\sum_{m=a,b,c} \sum_{k=1}^N P_m(k) Q_m(k)}{\sum_{m=a,b,c} \sum_{k=1}^N Q_m^2(k)} \quad (2.25)$$

Onde,

$$\begin{aligned} P_m(k) &= v_{mR}(k) - v_{mS}(k) - d \sum_{p=a,b,c} \left[ \left( R_{mp} + \left( \frac{L_{mp}}{\Delta t} \right) \right) i_{pR}(k) - \left( \frac{L_{mp}}{\Delta t} \right) i_{pR}(k-1) \right] \\ Q_m(k) &= d \sum_{p=a,b,c} \left[ \left( R_{mp} + \left( \frac{L_{mp}}{\Delta t} \right) \right) [i_{pR}(k) + i_{pS}(k)] - \left( \frac{L_{mp}}{\Delta t} \right) [i_{pR}(k-1) + i_{pS}(k-1)] \right] \\ m &= (a, b, c) \end{aligned} \quad (2.26)$$

Em que  $k$  é a actual amostragem;  $\Delta t$  é o período de tempo e S e R são os valores na extremidade de envio e na extremidade de recepção, respectivamente.

Em linhas de transmissão de longa distâncias é utilizado o modelo dos parâmetros distribuídos, onde é utilizada as equações (2.27) e (2.28) para localização de defeitos ocorridos [21].

$$\begin{aligned} v_b(k) &= \left[ \left( \frac{1}{2} \right) [v_{b-1}(k-1) + v_{b-1}(k+1)] + \left( \frac{Z_w}{2} \right) [i_{b-1}(k-1) - i_{b-1}(k+1)] \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{R\Delta x}{4} \right) [i_{b-1}(k+1) - i_{b-1}(k-1)] \right] \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} i_b(k) &= \left[ \left( \frac{1}{2Z_w} \right) [v_{b-1}(k-1) - v_{b-1}(k+1)] + \left( \frac{1}{2} \right) [i_{b-1}(k-1) + i_{b-1}(k+1)] \right. \\ &\quad \left. - \left( \frac{R\Delta x}{2Z_w} \right) i_b(k) - \left( \frac{R\Delta x}{4Z_w} \right) [i_{b-1}(k-1) + i_{b-1}(k+1)] \right] \end{aligned} \quad (2.28)$$

Onde  $\Delta x = \Delta t / \sqrt{LC}$  é a distâncias percorrida pela onda viajante,  $Z_w = \sqrt{L/C}$  é a impedância característica de onda e  $b$  é um ponto discreto da linha.

Estes métodos muitas vezes utilizam inteligência artificial e necessitam de relés de alta resolução juntamente com uma elevada capacidade computacional, sendo por isso na generalidade mais dispendiosos e complexos quando comparados com os métodos baseados em OV.

## CAPÍTULO 2. CONHECIMENTO PRÉVIO

---

Sendo objecto de estudo da presente dissertação os métodos baseados em OV os mesmos serão detalhados no próximo capítulo.



## LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS BASEADA EM ONDAS VIAJANTES

### 3.1 Método Baseado em Ondas Viajantes

Quando ocorre uma defeito existe a formação de uma onda que se propaga em direcção aos dois terminais da linha, a uma velocidade próxima da velocidade da luz [23].

O diagrama de Bewley é um método gráfico utilizado para representar a evolução temporal e direccional de ondas que se propagam entre os dois terminais de uma linha de transmissão. Este método gráfico é útil para o estudo dos métodos baseados em OV [24].

Existem dois tipos de sub-métodos baseados em OV: o método ondas viajantes nos dois extremos e o método ondas viajantes num só extremo, que respectivamente se diferenciam pelo cálculo do tempo da chegada da onda viajante aos dois extremos da linha e no tempo da chegada da onda viajante numa extremidade e a sua reflexão no local do defeito. Estes métodos serão de seguida descritos mais detalhadamente.

A detecção do início de cada defeito é feito através do módulo da diferença entre a amostra anterior da tensão e a amostra actual. Onde o valor do módulo se for superior a uma constante na ordem dos milésimos é porque ocorreu um defeito.

#### 3.1.1 Método das Ondas Viajantes nos Dois Extremos

O método OV nos dois extremos baseia-se na identificação dos tempos de chegada da onda após ocorrer o defeito a ambas as extremidades da linha [4], para tal é necessária uma sincronização o mais exacta possível entre os dois aparelhos que fazem a medição desses tempos. Essa sincronização pode ser alcançada através do uso de relógios sincronizados por satélite, como é feito em [25] ou através de um canal de fibra óptica ponto-a-ponto

entre os dois dispositivos, como é apresentado em [26].

A figura 3.1 mostra o diagrama de Bewley de uma linha simples com comprimento  $LL$ , onde ocorre um defeito  $F$ . Está representada os tempos de chegada das ondas viajantes provenientes do defeito a ambas extremidades da linha,  $t_S$  e  $t_R$ . O defeito ocorre à distância de  $M$  da extremidade  $S$  e à distancia  $LL-M$  da extremidade  $R$ .

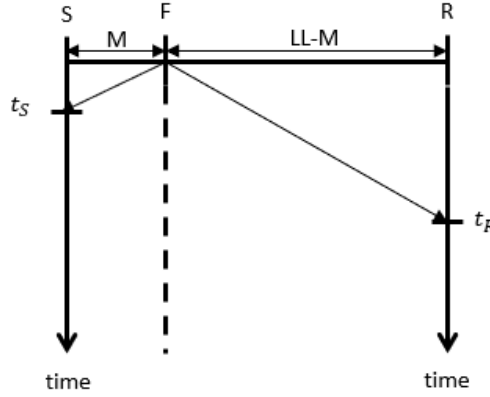


Figura 3.1: Diagrama de Bewley explicativo do método OV nos dois extremos

Conhecendo os parâmetros distribuídos da linha é possível calcular através da equação (2.14) a velocidade de propagação da onda ( $PV$ ).

Sabendo o comprimento total da linha ( $LL$ ) é possível calcular o tempo de propagação das ondas viajantes ( $TWLPT$ ) através da equação (3.1) [4].

$$TWLPT = \frac{LL}{PV} \quad (3.1)$$

Após a medição dos valores da corrente instantâneos nos dois extremos da linha (nas posições  $S$  e  $R$ ), estes valores são submetidos a um filtro passa-alto Butterworth de ordem 8 com uma frequência de corte de  $10000 \text{ rad/s}$ . Este filtro tem como objectivo extrair as ondas viajantes provocadas pela ocorrência das componentes harmónicas presentes na rede [4].

O passo seguinte é a utilização da transformada de Clarke, que tem como objectivo simplificar a análise de circuitos trifásico. Esta transformação faz a conversão do referencial natural ( $a, b, c$ ) para o referencial estacionário ( $0, \alpha, \beta$ ). Esta transformada é representada através da equação (3.2).

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Onde,  $I_0$ ,  $I_\alpha$  e  $I_\beta$  são as correntes no novo referencial, em que a corrente  $I_\alpha$  é utilizada em casos de defeitos que ocorram entre uma ou mais linhas e a terra e a corrente  $I_\beta$  é utilizada em casos onde ocorram defeitos entre duas ou mais fases.

Após a aplicação da transformada de Clarke nos dados da corrente é necessário identificar o primeiro pico da corrente após a ocorrência do defeito dos dados medidos em cada um dos extremos da linha. O máximo do primeiro pico que ocorre após o defeito é o tempo de chegada da onda viajante ao extremo da linha [8].

Através da aplicação do método OV nos dois extremos, utilizando todo procedimento acima explicado obteve-se as figuras 3.2 e 3.3. Estas figuras exemplificam a identificação do primeiro pico da corrente, em cada uma das extremidades, após a ocorrência de um defeito e a obtenção dos valores de  $t_S$  e  $t_R$ .

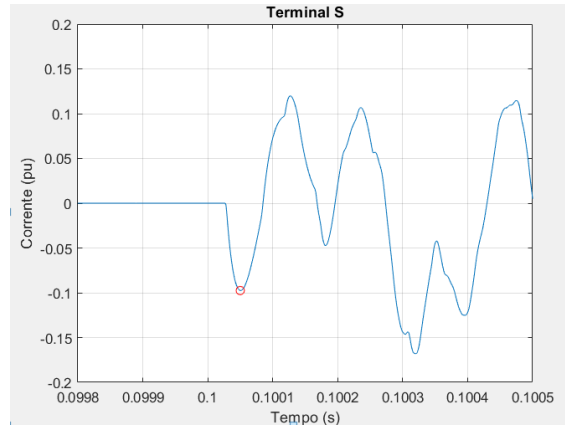


Figura 3.2: Exemplo do gráfico da identificação do tempo de chegada da OV através da corrente no terminal S

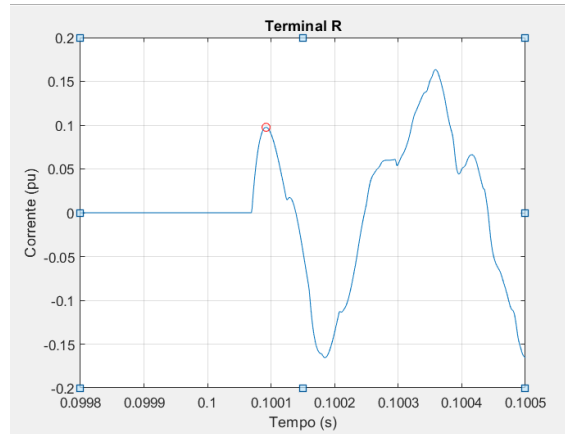


Figura 3.3: Exemplo do gráfico da identificação do tempo de chegada da OV através da corrente no terminal R

Após a identificação de  $t_S$  e  $t_R$  é possível calcular o local do defeito através da equação (3.3) [8].

$$M = \frac{LL}{2} \cdot \left( 1 + \frac{t_S - t_R}{TWLPT} \right) \quad (3.3)$$

Onde  $M$  é o local onde ocorreu o defeito,  $LL$  é o comprimento da linha,  $TWLPT$  é o tempo de propagação da onda viajante,  $t_S$  é o tempo de chegada da onda viajante ao terminal S e  $t_R$  é o tempo de chegada da onda viajante ao terminal R.

O processo anterior descrito foi automatizado e implementado em *MATLAB*. O fluxograma seguinte descreve a implementação do método.

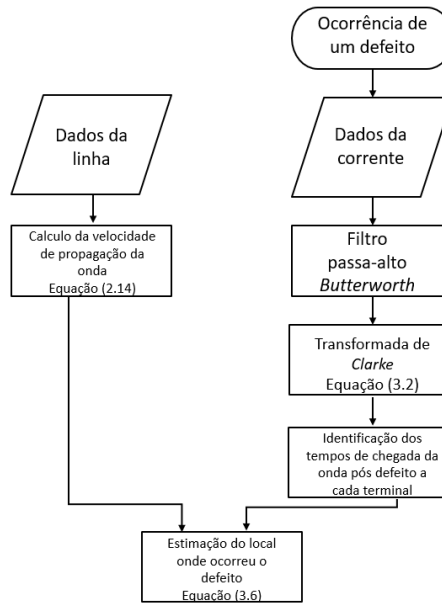


Figura 3.4: Fluxograma do método OV nos dois extremos

Como podemos observar pela figura 3.4, quando ocorre um defeito, são obtidos os dados da corrente, estes são submetidos a um filtro Butterworth passa-alto de ordem 8. É utilizada a transformada de Clarke, equação (3.2) mudando assim o referencial para um referencial estacionário  $(\alpha, \beta, 0)$ , sendo assim possível a identificação do primeiro pico após a ocorrência do defeito.

Através das características da linha é possível calcular a velocidade de propagação, com recurso à equação (2.13).

Sendo possível estimar o local onde ocorreu o defeito, recorrendo à equação (3.3).

### 3.1.2 Método das Ondas Viajantes num Só Extremos

O método de OV num só extremo baseia-se na diferença entre os tempos da chegada da primeira onda pós defeito ao terminal onde se efectuam as medições e a chegada da onda que reflecte no local onde ocorreu o defeito, permitindo assim o cálculo da localização do defeito que ocorreu [23].

Este método utiliza apenas valores medidos numa extremidade da linha pelo que é importante conseguir identificar a chegada a onda reflectida no local onde ocorreu o defeito entre as ondas que podem ter sido reflectidas no terminal oposto.

Para o cálculo do local onde ocorreu o defeito é necessário ter em conta três cenários: defeitos ocorridos na primeira metade da linha ( $M < LL-M$ ); defeitos ocorridos a meio da linha ( $M = LL-M$ ) e defeito ocorridos na segunda metade da linha ( $M > LL-M$ ), tal como apresenta a figura 3.5.

A figura 3.5 mostra três linhas simples com comprimento  $LL$ , onde ocorre um defeito em  $F$ . Usando o diagrama de Bewley podemos observar os três cenários acima enunciados. O primeiro e o segundo cenários não são influenciados pelas reflexões que ocorrem na extremidade oposta, o mesmo não ocorre no terceiro cenário onde existe a chegada de reflexões provenientes da extremidade oposta ocorre primeiro que a reflexão da onda no local da falha.

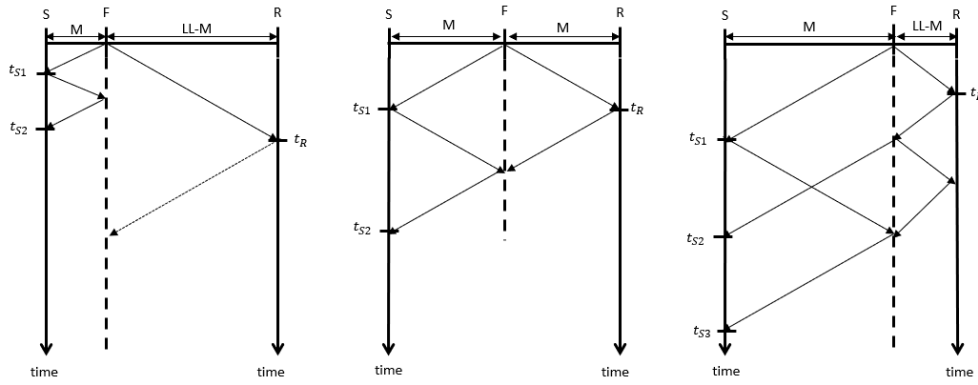


Figura 3.5: Diagramas de Bewley explicativo do método OV num só extremo

Sendo que a onda que reflecte no terminal oposto da linha apresenta uma polaridade oposta à onda que reflecte no local onde ocorreu o defeito, então é possível identificar em que cenário estamos presentes [27].

Tal como no método OV nos dois extremos, pela equação (2.13) é possível obter a velocidade da propagação da onda viajante ( $PV$ ).

O primeiro passo para a aplicação destes método é identificar o início do defeito e identificar quando acaba o meio período após a ocorrência deste, de modo a restringir os dados obtidos a meio período de onda.

Ficando assim os nossos dados da corrente e da tensão restritos a um intervalo de tempo de meio período, como se pode observar pela figura 3.6.

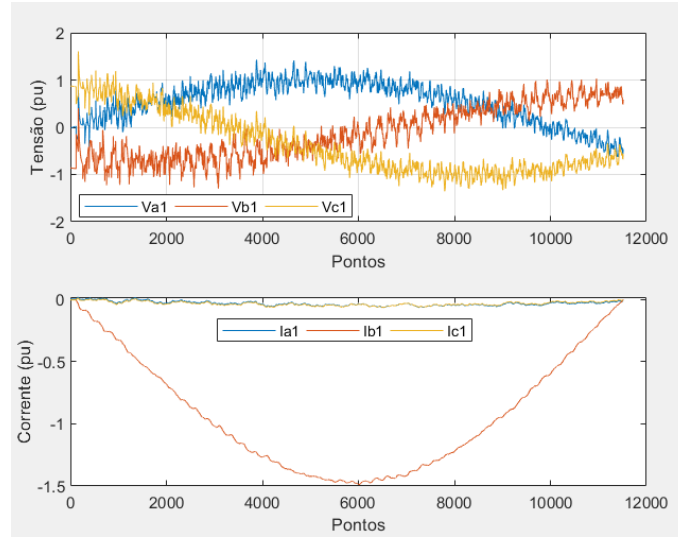


Figura 3.6: Gráficos da corrente e tensão no primeiro meio período pós-defeito

Para separar o sistema trifásico, os sinais do domínio de fase precisam ser transformados em componentes modais. A utilização da transformada de Karrenbauer tem como objectivo mudar os valores de fase para valores modais. Esta transformada de Karrenbauer que é representada para a corrente e para a tensão pelas equações 3.4 e 3.5, respectivamente [27].

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Na matriz acima a componente  $\alpha$ -modal é o valor modal de linha entre as fases A e B e a componente  $\beta$ -modal é o valor modal de linha entre as fases A e C, é possível então adicionar a componente  $\gamma$ -modal, através da somas da segunda e terceira linha, obtendo-se então o valor modal de linha entre as fases B e C. Cada um destes componentes representam uma equação do modo de propagação [28].

Depois da aplicação da transformada Karrenbauer aos dados obtidos o passo seguinte é aplicar a transformada discreta da onda (DWT), definida pela equação (3.6) [29].

$$DWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x(n) \psi^* \left( \frac{n-b}{a} \right) \quad (3.6)$$

Esta transformada faz a convolução do sinal  $x(n)$ , discreto no tempo com o filtro escalar passa-baixo seguido de decimação (redução do ritmo de amostragem) por um factor de dois, sendo assim possível obter os coeficientes de aproximação ( $A_1$ ). De forma semelhante ocorre, ao aplicar-se a convolução do sinal  $x(n)$  com o filtro escalar passa-alto

seguido de decimação por um factor de dois, sendo assim possível obter os coeficientes de detalhe ( $D_1$ ).

Na equação (3.5) as grandezas  $n$ ,  $b$  e  $a$  são respectivamente a amostragem discretas do tempo, a translação e os parâmetros de dimensionamento.

A figura 3.7 apresenta o esquema de decomposição de um sinal em coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhe.

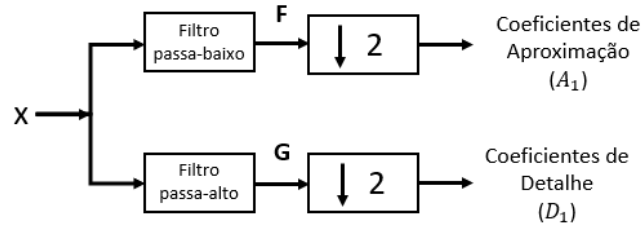


Figura 3.7: Decomposição de um sinal em coeficientes de aproximação ( $A_1$ ) e coeficientes de detalhe ( $D_1$ ) ( adaptado de [30] )

Onde,  $x$  é o sinal original,  $F$  é o sinal obtido após o filtro passa-baixo,  $G$  é o sinal obtido após o filtro passa-alto,  $A_1$  é o resultado sinal da redução de amostragem para o filtro passa-baixo e  $D_1$  é o resultado sinal da redução de amostragem para o filtro passa-alto.

É necessário escolher o tipo de onda mãe, isto é, a onda que serve de comparação. Existem vários tipos de ondas mãe, como as ondas de Harr, Coiflet, Symmlet e Daubichies (db). Como estamos num caso de distorções transitórias pequenas e rápidas usar-se-á nestes casos o db4 [31], representado na figura 3.8.

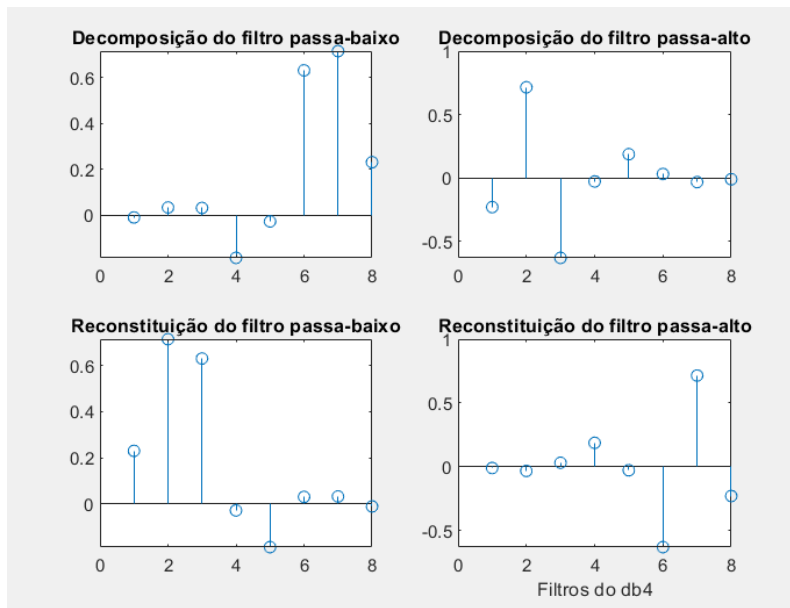


Figura 3.8: Filtros do db4

Na figura 3.8 são apresentados os gráficos filtros db4 utilizados para decomposição do sinal e reconstituição do mesmo.

Através da aplicação do método num só extremo obtiveram-se os gráficos presentes nas figuras 3.9 e 3.10. A primeira figura apresenta os gráficos obtidos da transformada de Karrenbauer da tensão, os respectivos coeficientes de aproximação e de detalhe e a segunda figura apresenta os gráficos obtidos da transformada de Karrenbauer da corrente e os respectivos coeficientes de aproximação e de detalhe.

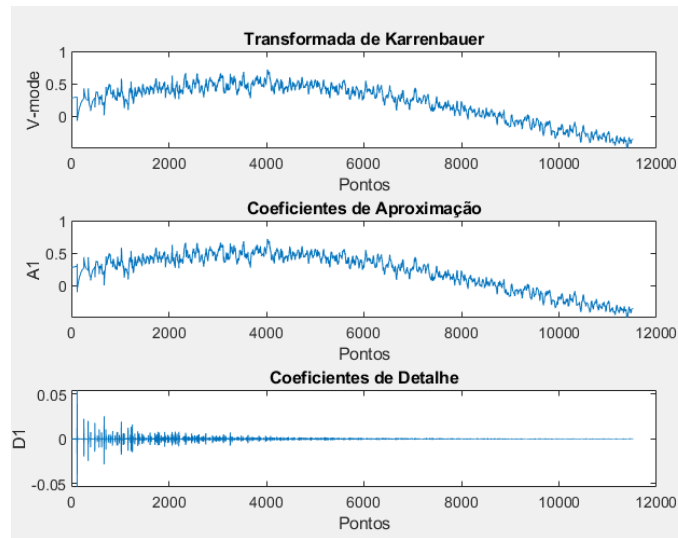


Figura 3.9: Exemplo dos gráficos da transformada de Karrenbauer, dos coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhe para a tensão

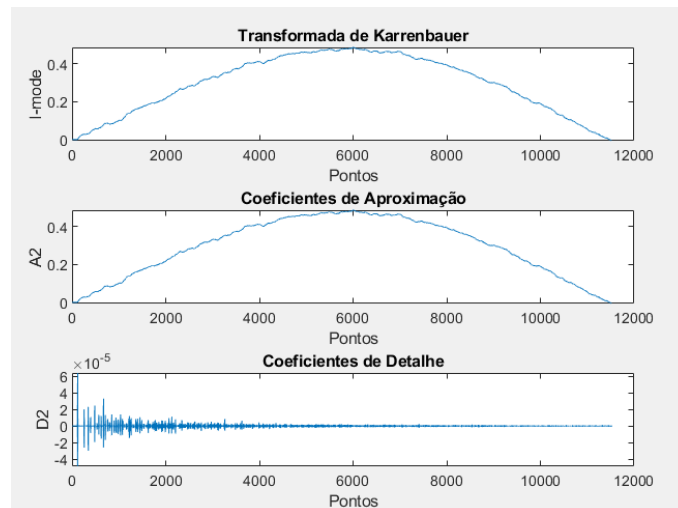


Figura 3.10: Exemplo dos gráficos da transformada de Karrenbauer, coeficientes de aproximação e coeficientes de detalhe para a corrente

Pela decomposição do sinal em coeficientes de detalhe, apresentados nas figuras 3.11 e 3.12, é possível identificar os máximos das duas primeiras barras, possibilitando assim



a obtenção da diferença entre a amostra da primeira onda a chegar ao terminal  $P_1$  e a amostra da primeira reflexão no local de defeito a chegar ao terminal  $P_2$ .

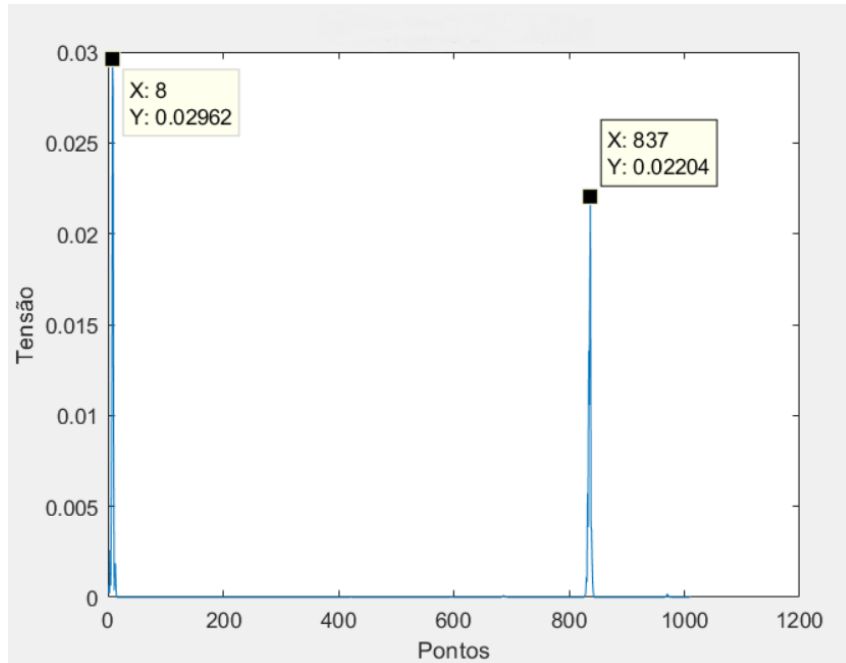


Figura 3.11: Exemplo do gráfico coeficientes de detalhe para a tensão

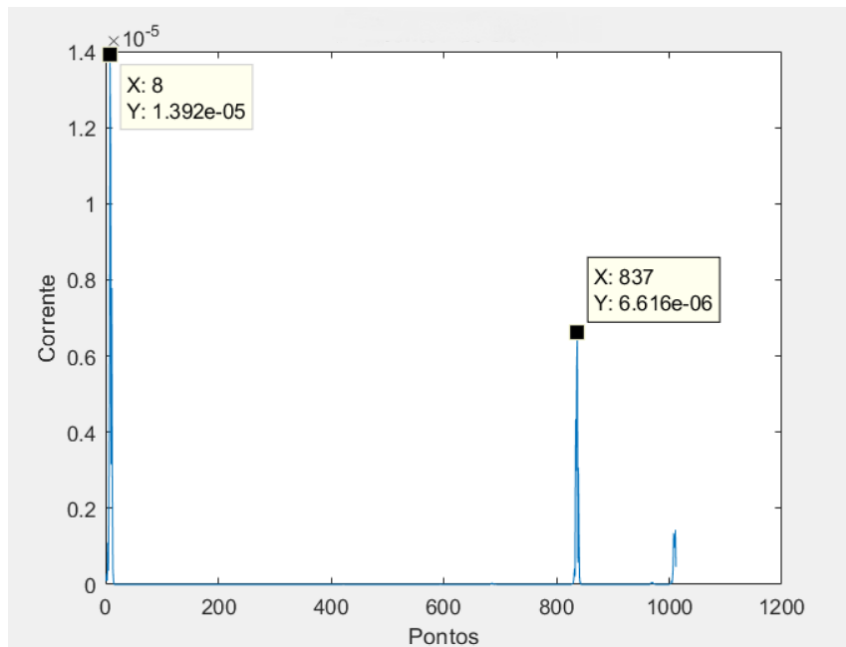


Figura 3.12: Exemplo do gráfico de coeficientes de detalhe para a corrente

Com estes dados é possível calcular o local do defeito recorrendo à equação (3.7), referente ao cenário 1 ou equação (3.8), que é referente ao cenário 3. No cenário 2 ambas as equações são válidas.

$$M = \frac{PV}{2} \cdot \left( \frac{P_2 - P_1}{FS} \right) \quad (3.7)$$

$$M = LL - \frac{PV}{2} \cdot \left( \frac{P_2 - P_1}{FS} \right) \quad (3.8)$$

Onde  $M$  é o local onde ocorreu o defeito,  $LL$  é o comprimento da linha,  $PV$  é a velocidade de propagação da onda viajante,  $FS$  é a frequência de amostragem,  $P_1$  é a posição referente à chegada da primeira onda após o defeito ao terminal e  $P_2$  é a posição referente à chegada da primeira onda reflectida no local da falta ao terminal.

De modo a ilustrar cada um dos passos necessários para a localização de defeitos utilizando o método OV num só extremo é apresentado em fluxograma na figura 3.13.

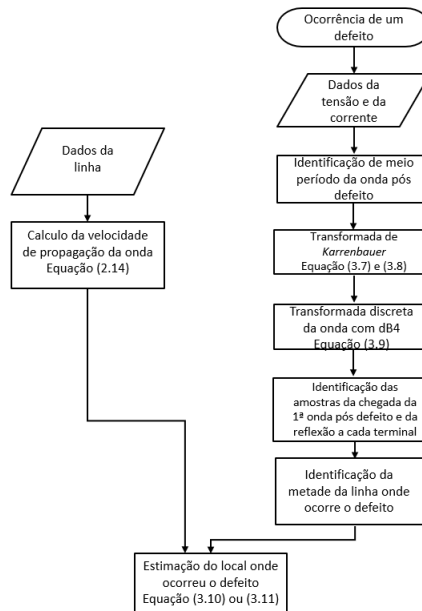


Figura 3.13: Fluxograma do método OV num só extremo

Como podemos observar pela figura 3.4, quando ocorre um defeito de um defeito, são obtidos os dados da corrente, é identificado o primeiro meio período após a ocorrência da falha, restringidos assim os dados. É utilizada a transformada de Karrenbauer, equação (3.4) e (3.5), para a corrente e para a tensão. De seguida é utilizada a da transformada discreta da onda, onde através dos coeficientes de detalhe é possível a identificação das amostras da chegada da onda ao terminal e da reflexão desta no defeito.

Agora é necessário identificar em que metade da linha ocorreu a falha recorrendo à polaridade da onda viajante.

Através das características da linha é possível calcular a velocidade de propagação, com recurso equação (2.14).

Sendo agora possível estimar o local onde ocorreu o defeito, recorrendo à equação (3.7) se ocorreu na primeira metade da linha ou à equação (3.8) se ocorreu na segunda metade.

## CASOS DE ESTUDO

## 4.1 Modelo e Características da Linha

Para testar os sub-métodos baseados em OV referidos no capítulo anterior, estes foram implementados no *MATLAB* e foi utilizado o *Simulink* para simular os defeitos de modo a aplicar os métodos.

Numa primeira fase foi efectuado um estudo da influência da frequência de amostragem na exactidão na obtenção de resultados.

Numa segunda fase, obtiveram-se os resultados dos três casos de estudo que foram referidos na introdução: linha simples, linhas em paralelo e linha em T.

Relativamente os defeitos simulados considerou-se que ocorrem entre os 0,1 s e os 0,5 s e que a resistência do defeito e a resistência da terra são praticamente nulas.

Considerou-se que todas as linhas em teste operaram a uma tensão de 150 kV e a uma frequência de 50 Hz.

Os parâmetros distribuídos de todas as linhas as utilizados são os expressos na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros distribuídos das linhas em estudo

$R_1$ [ $\Omega/\text{km}$ ]	$R_0$ [ $\Omega/\text{km}$ ]	$L_1$ [ $\text{mH}/\text{km}$ ]	$L_0$ [ $\text{mH}/\text{km}$ ]	$C_1$ [ $\text{nF}/\text{km}$ ]	$C_0$ [ $\text{nF}/\text{km}$ ]
0,01273	0,38640	0,93370	4,12640	12,74000	7,75100

A impedância de sequência positiva ( $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ ) é a impedância dos componentes do caso de estarmos na presença de carga simétrica.

Para a sequência zero ( $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$ ), os valores depende dos dados geométricos das linhas, do trajecto de retorno (neutro e/ou terra), da condutibilidade do solo, do isolamento, entre outros factores.

Foi utilizado um modelo representativo de uma linha de transporte de energia que usa parâmetros distribuídos.

Este modelo é constituído por um ou dois relés consoante o método que se esteja a utilizar, por dois blocos representativos do modelo dos parâmetros distribuído da linha, onde entre esses dois blocos é simulado um defeito. Tal como podemos observar pela figura 4.1.

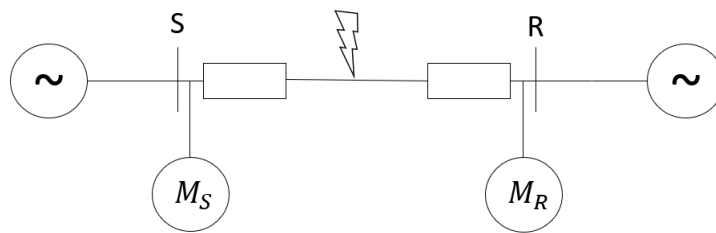


Figura 4.1: Representação da linha simples em estudo

Os dois blocos representativos do modelo da linha permitem ajustar o comprimento de modo a que seja simulado o defeito no local pretendido e de modo a que a linha tenha sempre o mesmo comprimento.

A figura 4.1 representa uma linha simples que corresponde ao primeiro caso de estudo. Para os outros casos o modelo é semelhante, sendo as alterações a este especificadas em cada uma das secções respectivas referentes a esses casos de estudo.

## 4.2 Linha Simples

O primeiro caso de estudo aborda a localização de um defeito numa linha simples, podendo este caso ser considerado como caso base.

Tanto neste caso como no das linhas paralelas foi considerado linhas de 28 km, optando-se por este valor uma vez que corresponde ao comprimento médio das linhas de 150 kV em Portugal.

As distâncias consideradas para a localização dos defeitos simulados foram: 8 km, 12 km, 16 km e 20 km.

A figura 4.2 apresenta a implementação do modelo de blocos apresentado na figura 4.1 no *Simulink*. Os resultados obtidos foram simulados para dois modelos de blocos semelhante, em que apenas se diferenciam num componente presente. Uma das linhas apresenta um gerador ligado à extremidade R e a outra linha apresenta nesse mesmo local uma carga.

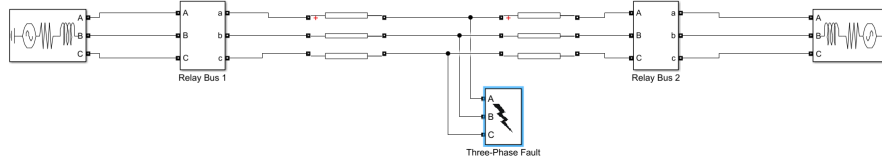


Figura 4.2: Modelo do *Simulink* para o método OV nos dois extremos para a linha simples

A figura 4.3 mostra o modelo usado no *Simulink* com base na figura 4.1, permitindo assim simular o caso de estudo de uma linha simples para o método referente a um só extremo, sendo que as várias grandezas são apenas medidas no início da linha.

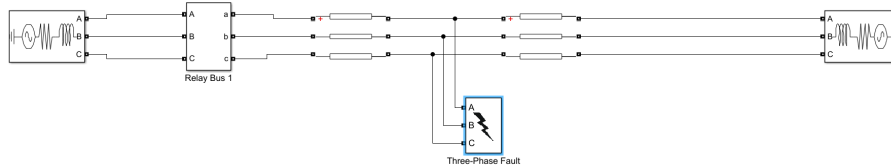


Figura 4.3: Modelo do *Simulink* para o método OV num só extremo para a linha simples

Tal como ocorreu para o método referente aos dois extremos foram testadas duas linhas semelhantes em que apenas diferiam no elemento presente no terminal R, sendo que num dos casos foi testada uma linha com um elemento gerador nesse mesmo local e no outro caso foi testada com um elemento de carga.

Foram feitas simulações para todos os tipos de defeitos, sendo os resultados dessas simulações apresentados no capítulo 5.

### 4.3 Linhas em Paralelo

Neste segundo caso de estudo o modelo usado é semelhante ao modelo usado para a linha simples, diferindo do anterior apenas numa linha paralela que foi adicionada à linha já existente, tal como apresenta a figura 4.4. A nova linha que foi introduzida tem os mesmos 28 km de comprimento e os mesmos parâmetros distribuídos.

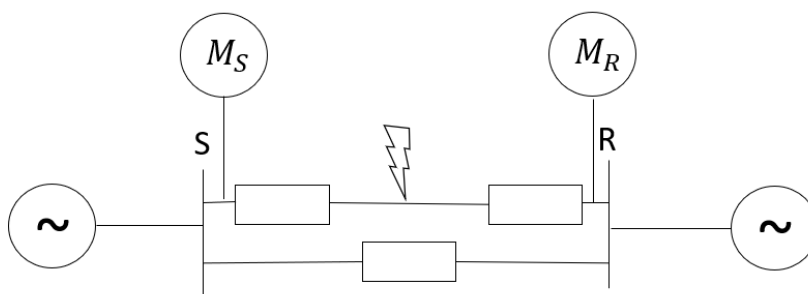


Figura 4.4: Representação através de blocos do modelo das linhas em paralelo em estudo

A figura 4.5 mostra o modelo usado em *Simulink* para simular o método referente aos dois extremos e tal como aconteceu na linha simples foram obtidos resultados para dois cenários que apenas se diferenciam no elemento ligado ao terminal R.

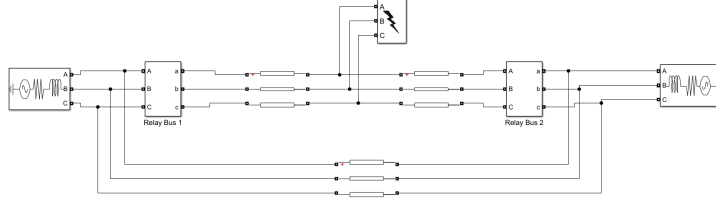


Figura 4.5: Modelo do *Simulink* para o método OV nos dois extremos para duas linhas em paralelo

Para este caso há que ter em conta que tal como é apresentado em [32], independentemente da metade da linha onde ocorra o defeito, para o método OV num só extremo apenas se usa a equação (3.8) para calcular o local do defeito ocorrida. Tal como se sucedeu no caso anterior os locais de defeito simulados foram aos 8 km, 12 km, 16 km e 20 km, permitindo assim que possa haver uma comparação directa dos resultados obtidos nos dois casos.

A figura 4.6 representa o modelo usado em *Simulink* para a obtenção dos resultados do método referente a um só extremo para duas linhas paralelas iguais.

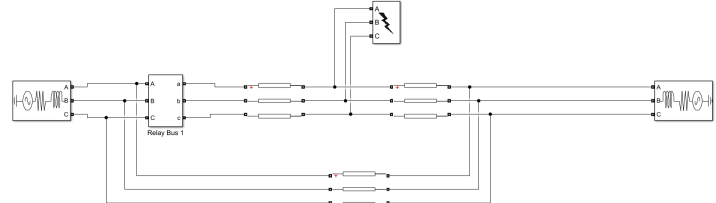


Figura 4.6: Modelo do *Simulink* para o método OV num só extremo para duas linhas em paralelo

Os resultados dos métodos aplicados para a localização de defeitos neste caso encontram-se expressos no capítulo 5.

#### 4.4 Linha em T

Este terceiro e último caso refere-se a uma linha em T. Este cenário apresenta uma linha na forma de um T, em foi introduzida a meio de uma linha simples num linha com um elemento de geração, tal como se pode observar pela figura 4.7, que também representa as dimensões de cada um dos troços da linha. O troço S-T ( $L_{ST}$ ) mede 14 km, o troço T-R ( $L_{TR}$ ) mede 14 km e o troço K-T mede 10 km ( $L_{KT}$ ).

Devido à existência destes três troços é necessário um relé em cada um dos terminais, como tal para este tipo de linha não será feita a comparação entre os resultados para o método referente aos dois extremos e os resultados do método referente a um só extremo, sendo os resultados obtidos usando apenas o método referente aos dois extremos.

Se apenas medirmos as várias grandezas no início da linha é impossível a identificação do troço onde ocorre a falha, assim sendo o método referente a um só extremo não pode ser usado para esta tipologia de linha. Isto é, se for utilizado apenas um relé no terminal S, se um defeito ocorrer depois de T não é possível identificar se a falha ocorreu no troço T-R ou no troço K-T.

As localizações onde foram simuladas os defeitos foram:

- No troço S-T entre os 4 km e os 10 km.
- No troço T-R entre os 4 km e os 10 km
- No troço K-T entre os 4 km e os 6 km

Sendo que ambas as linha utilizadas tem os mesmos parâmetros distribuídos que foram apresentados anteriormente na tabela 4.1.

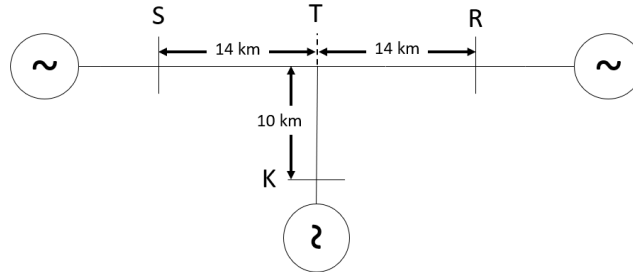


Figura 4.7: Modelo representativo das dimensões de cada troço usado para a obtenção de resultados da linha em T

O grande desafio deste tipo de linha é identificar correctamente o troço onde ocorreu o defeito. Como é apresentado em [33], a partir das equações (4.1), (4.2) e (4.3) é possível identificar em qual troço ocorreu o defeito.

Para além de ser necessário saber as dimensões de cada troço, para estas três equações é necessário saber os tempos de chegada das ondas viajantes aos três terminais,  $t_S$ ,  $t_R$  e  $t_K$ , o tempo em que começou o defeito  $t_0$  e a velocidade de propagação da onda  $PV$ .

Quando o defeito ocorre no troço S-T:

$$\begin{cases} -PV \times (t_S - t_0) + L_{ST} = x_1 \\ PV \times (t_R - t_0) - L_{TR} = x_1 \\ PV \times (t_K - t_0) - L_{KT} = x_1 \end{cases} \quad (4.1)$$

Quando o defeito ocorre no troço T-R:

$$\begin{cases} PV \times (t_S - t_0) - L_{ST} = x_2 \\ -PV \times (t_R - t_0) + L_{TR} = x_2 \\ PV \times (t_K - t_0) - L_{KT} = x_2 \end{cases} \quad (4.2)$$

Quando o defeito ocorre no troço K-T:

$$\begin{cases} PV \times (t_S - t_0) - L_{ST} = x_3 \\ PV \times (t_R - t_0) - L_{TR} = x_3 \\ -PV \times (t_K - t_0) + L_{KT} = x_3 \end{cases} \quad (4.3)$$

Onde  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  é a distância do defeito ao local T,  $t_0$  é o tempo em que ocorreu o defeito e  $t_S$ ,  $t_R$  e  $t_K$  são os tempos de chegada da onda viajante aos terminais S, R e K, respectivamente. Para se identificar o troço onde ocorreu o defeito é necessário que  $x_n > 0$  ( $n \in [1, 2, 3]$ ) [33].

O modelo usado no *Simulink* para simular a linha em T é apresentado na figura 4.8, o mesmo teve como base o modelo apresentado na figura 4.7.

De forma idêntica ao ocorrido nos cenários anteriores foram utilizados dois casos para se obterem os resultados referentes a esta tipologia de linha. Um em que se encontra um elemento gerador ligado ao terminal R e outro em que está ligado ao terminal R um elemento de carga.

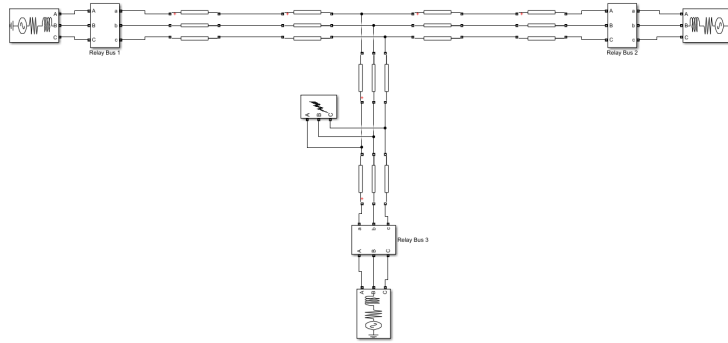


Figura 4.8: Modelo do *Simulink* utilizado para simular uma linha em T

Os resultados obtidos para cada uma das simulações efectuada em cada um dos troços serão apresentados no próximo capítulo.

## 4.5 Influência da Frequência de Amostragem

Foi ainda efectuada um estudo da influência da frequência de amostragem na precisão localização onde ocorreu o defeito. Este estudo permitiu fazer a identificação da melhor frequência de amostragem, para a obtenção dos resultados das próximas secções.

Como tal foi decidido utilizar uma linha simples com dupla geração, exactamente igual à figura 4.1, para se obter os resultados referentes a este estudo.



Foram escolhidos dois cenários com dimensões distintas. Um cenário primeiro considera uma linha com dimensões pequenas (14 km) e um segundo cenário considera uma linha de grandes dimensões, (96,7 km). Esta ultima dimensão correspondente à linha de 150 kV de maior dimensão existente em Portugal.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos foram utilizado dois erros relativos diferentes. O erro relativo à localização do defeito, expresso na equação (4.4), tal como é usado em [15], sendo este o erro relativo convencional. No entanto os trabalhos [29] [34] [35], utilizam o erro relativo ao comprimento total da linha em estudo, expresso na equação (4.5).

$$\text{Erro relativo local(\%)} = \frac{|\text{Local estimado} - \text{Local exacto do defeito}|}{\text{Local exacto do defeito}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

$$\text{Erro relativo comp.(\%)} = \frac{|\text{Local estimado} - \text{Local exacto do defeito}|}{\text{Comprimento da linha}} \cdot 100 \quad (4.5)$$

A equação 4.5 permite que erros com a mesma diferença entre o local estimado e o local exacto do defeito que ocorram em locais diferentes apresentem o mesmo erro relativo.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Influência da Frequência de Amostragem

Nesta secção apresentam-se os resultados referentes aos testes das duas linhas simples com dimensões diferentes. Uma linha de 96.7 km, correspondente a uma linha de grande dimensões e uma de 14 km, que corresponde a uma linha de pequenas dimensões. Estes testes foram feitos para diferentes frequências de amostragem de modo a estudar a influência desta nos resultados obtidos.

Foram utilizados os dois métodos em estudo neste documento, para realização do estudo da influência da frequência de amostragem.

No primeiro caso de uma linha de grande dimensão foi simulado um defeito do tipo DLT aos 20 km, 40 km, 56,7 km e 76,7 km. Os resultados apresentados foram obtidos com frequência de amostragem 6 MHz, 3 MHz, 1 MHz, 0,6 MHz, 0,3 MHz e 0,1 MHz.

Os resultados para esta linha de grandes dimensões e para os dois sub-métodos de localização de defeitos baseados em OV estão apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos nas tabelas 5.1 e 5.2 foram utilizados os erros relativos expressos nas equações (4.4) e (4.5).

Tabela 5.1: Resultados do método OV nos dois extremos numa linha de 96,7 km

Método		Nos dois extremos			
Comprimento (km)		96,7			
Local (km)		20	40	56,7	76,7
6 MHz	Obtido (km)	19,994	39,990	56,710	76,692
	Erro relativo local (%)	0,032	0,025	0,018	0,011
	Erro relativo comp. (%)	0,007	0,010	0,010	0,084
3 MHz	Obtido (km)	19,984	39,990	56,710	76,716
	Erro relativo local (%)	0,080	0,025	0,018	0,021
	Erro relativo comp. (%)	0,017	0,010	0,010	0,017
1 MHz	Obtido (km)	20,081	39,942	56,758	76,619
	Erro relativo local (%)	0,403	0,146	0,103	0,105
	Erro relativo comp. (%)	0,083	0,060	0,060	0,083
0,6 MHz	Obtido (km)	19,839	40,135	56,565	76,861
	Erro relativo local (%)	0,805	0,337	0,238	0,210
	Erro relativo comp. (%)	0,167	0,140	0,140	0,167
0,3 MHz	Obtido (km)	19,839	40,135	56,565	76,861
	Erro relativo local (%)	0,805	0,337	0,238	0,210
	Erro relativo comp. (%)	0,167	0,140	0,140	0,167
0,1 MHz	Obtido (km)	20,801	39,652	57,048	75,895
	Erro relativo local (%)	4,027	0,871	0,614	1,050
	Erro relativo comp. (%)	0,833	0,360	0,360	0,833

Tabela 5.2: Resultados do método OV num só extremo numa linha de 96,7 km

Método		Num só extremo			
Comprimento (km)		96,7			
Local (km)		20	40	56,7	76,7
6 MHz	Obtido (km)	20,030	40,036	56,700	76,706
	Erro relativo local (%)	0,151	0,091	0,000	0,008
	Erro relativo comp. (%)	0,031	0,037	0,000	0,006
3 MHz	Obtido (km)	20,030	40,060	56,640	76,646
	Erro relativo local (%)	0,151	0,151	0,107	0,071
	Erro relativo comp. (%)	0,031	0,062	0,062	0,056
1 MHz	Obtido (km)	20,079	39,722	56,543	76,694
	Erro relativo local (%)	0,393	0,695	0,277	0,008
	Erro relativo comp. (%)	0,081	0,287	0,162	0,006
0,6 MHz	Obtido (km)	20,296	40,350	56,833	77,008
	Erro relativo local (%)	1,480	0,876	0,234	0,402
	Erro relativo comp. (%)	0,306	0,362	0,013	0,319
0,3 MHz	Obtido (km)	20,538	40,592	56,108	76,162
	Erro relativo local (%)	2,688	1,480	1,044	0,701
	Erro relativo comp. (%)	0,556	0,612	0,612	0,556
0,1 MHz	Obtido (km)	21,746	41,317	58,283	75,679
	Erro relativo local (%)	8,728	3,292	2,791	1,331
	Erro relativo comp. (%)	1,805	1,362	1,637	1,056

## 5.1. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

As figuras 5.1 e 5.2, apresentam a relação entre a frequência de amostragem e o erro relativo ao local do defeito para ambos os métodos.



Figura 5.1: Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 96.7 km para o método OV nos dois extremos

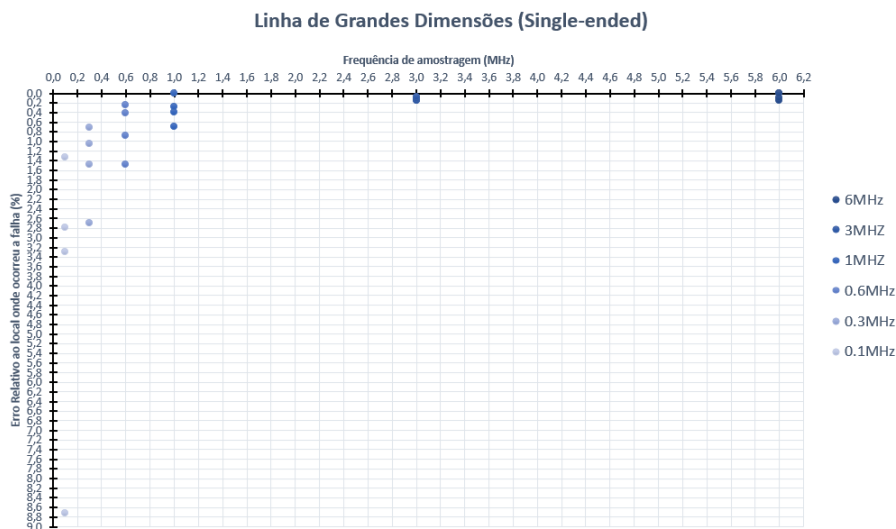


Figura 5.2: Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 96.7 km para o método OV num só extremo

As tabelas 5.3 e 5.4 apresentam os resultados obtidos para os defeitos simulados aos 4 km, aos 6 km, aos 8 km e aos 10 km numa linha de 14 km. Sendo que cada uma destes defeitos foram simulados à frequência de amostragem de 6 MHz, 3 MHz, 1 MHz, 0,6 MHz e 0,3 MHz.

Para melhor compreensão dos resultados obtidos nas tabelas 5.3 e 5.4 foram utilizados os erros relativos expressos nas equações (4.4) e (4.5).

Tabela 5.3: Resultados do método OV nos dois extremos numa linha de 14 km

Método		Nos dois extremos			
Comprimento (km)		14			
Local (km)		4	6	8	10
6 MHz	Obtido (km)	4,004	5,985	8,015	9,996
	Erro relativo local (%)	0,098	0,247	0,185	0,039
	Erro relativo comp. (%)	0,028	0,106	0,106	0,028
3 MHz	Obtido (km)	4,004	5,985	8,015	9,996
	Erro relativo local (%)	0,098	0,247	0,185	0,039
	Erro relativo comp. (%)	0,028	0,106	0,106	0,028
1 MHz	Obtido (km)	4,101	6,130	7,870	9,899
	Erro relativo local (%)	2,514	2,170	1,628	1,006
	Erro relativo comp. (%)	0,718	0,930	0,930	0,718
0,6 MHz	Obtido (km)	3,859	5,792	8,208	10,141
	Erro relativo local (%)	3,526	3,468	2,601	1,410
	Erro relativo comp. (%)	1,007	1,486	1,486	1,007
0,3 MHz	Obtido (km)	6,034	7,000	7,000	7,967
	Erro relativo local (%)	50,838	16,667	12,500	20,335
	Erro relativo comp. (%)	14,525	7,143	7,143	14,525

Tabela 5.4: Resultados do método OV num só extremo numa linha de 14 km

Método		Num só extremo			
Comprimento (km)		14			
Local (km)		4	6	8	10
6 MHz	Obtido (km)	4,035	5,992	7,984	9,965
	Erro relativo local (%)	0,876	0,131	0,204	0,350
	Erro relativo comp. (%)	0,250	0,056	0,117	0,250
3 MHz	Obtido (km)	4,059	5,992	7,984	9,941
	Erro relativo local (%)	1,480	0,131	0,204	0,592
	Erro relativo comp. (%)	0,423	0,056	0,117	0,423
1 MHz	Obtido (km)	4,204	6,161	8,056	10,086
	Erro relativo local (%)	5,104	2,688	0,702	0,858
	Erro relativo comp. (%)	1,458	1,152	0,401	0,613
0,6 MHz	Obtido (km)	3,745	6,161	7,718	9,651
	Erro relativo local (%)	6,373	2,688	3,526	3,491
	Erro relativo comp. (%)	1,821	1,152	2,015	2,494
0,3 MHz	Obtido (km)	4,591	6,524	7,718	10,376
	Erro relativo local (%)	14,769	8,729	3,526	3,757
	Erro relativo comp. (%)	4,220	3,741	2,015	2,684

A partir das tabelas 5.3 e 5.4 foi possível obter os gráficos apresentados nas figuras 5.3 e 5.4 onde se apresentam a relação frequência de amostragem - erro relativo ao local do defeito para os métodos referente aos dois extremos e referente a um só extremo respectivamente.

## 5.1. INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

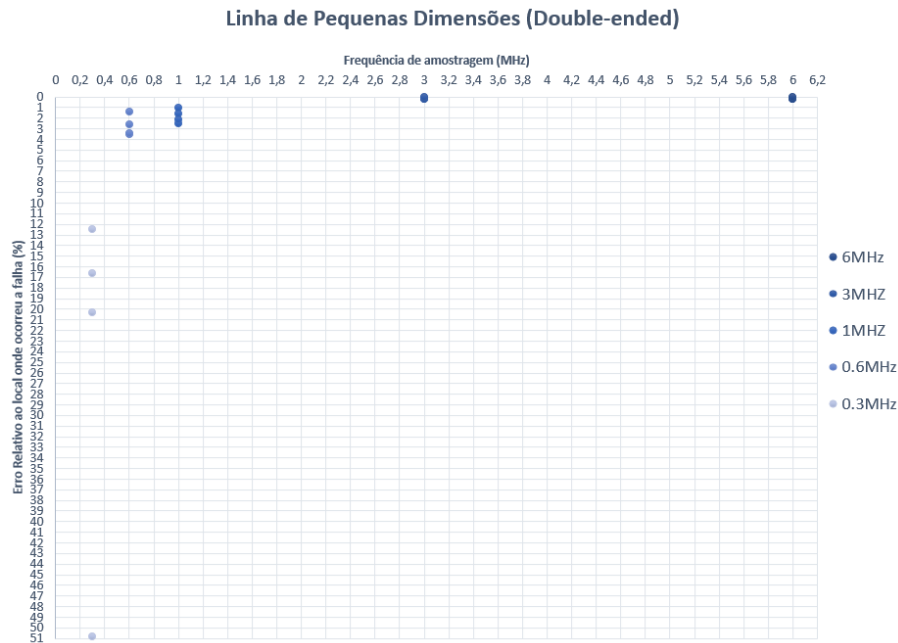


Figura 5.3: Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 14 km para o método OV nos dois extremos

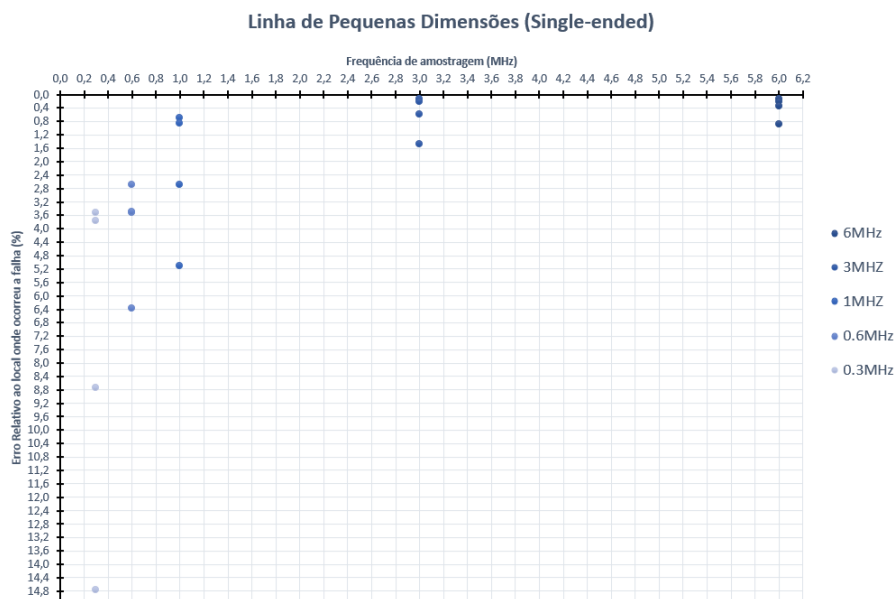


Figura 5.4: Gráfico Frequência de amostragem - Erro relativo ao local do defeito numa linha de 14 km para o método OV num só extremo

A partir dos dois métodos baseados em OV foi possível obter as tabelas acima apresentadas, onde podemos observar que se obtém resultados mais precisos para linhas de maiores dimensões quando comparando com linhas de menores dimensões.

Quando comparados os dois métodos em estudos podemos observar que os resultados obtidos para o método referente aos dois extremos apresentam um erro relativo inferior

aos resultados obtidos para o método referente a um só extremo.

Tal como era esperado, os resultados obtidos para frequências de amostragem mais elevadas apresentam um erro relativo muito inferior aos resultados obtidos à medida que se vai baixando a frequência de amostragem utilizada.

Através dos resultados obtidos para influência da frequência de amostragem, observou-se que em linhas de maiores dimensões os resultados para frequências de amostragem mais baixas tem um erro relativo associado menor que em linhas mais pequenas.

Assim foi possível escolher a frequência de amostragem o mais baixa possível, de modo a tornar o algoritmo rápido, e ao mesmo tempo certificar que os resultados obtidos não comprometam a localização do local onde ocorreu o defeito. Assim sendo, decidiu-se utilizar a frequência de amostragem de 1 MHz para a obtenção dos resultados para os três casos de estudo que serão apresentados nas próximas secções deste documento.

## 5.2 Linha Simples

Os resultados obtidos por aplicação do método referente aos dois extremos na linha simples para o tipo de defeito DLT são apresentados nas tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT

Geração - Geração				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	7,911	11,970	16,030	20,089
Erro relativo local (%)	1,101	0,247	0,185	0,444
Erro relativo comp. (%)	0,317	0,106	0,106	0,317

Tabela 5.6: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLT

Geração - Carga				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,056	11,970	16,030	20,089
Erro relativo local (%)	0,702	0,247	0,185	0,444
Erro relativo comp. (%)	0,201	0,106	0,106	0,317



Observa-se que o método é bastante preciso tanto para uma linha simples de dupla geração como para uma linha com geração apenas numa das extremidades, apresentando resultados semelhantes para os dois casos. O erro relativo ao local do defeito mais elevado apresentado, nas duas tabelas é de 1,101 %, ou seja, o método teve uma diferença entre o valor detectado e a localização do local exacto do defeito inferior a 89 m.

O mesmo procedimento foi tido para o método referente a um só extremo, sendo que os resultados obtidos estão expressos nas tabelas 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT

<b>Geração - Geração</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,973	12,178	16,185	20,027
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,333	1,480	1,155	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,095	0,634	0,660	0,095

Tabela 5.8: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo linha-terra

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,901	12,178	15,895	20,172
<b>Erro relativo local (%)</b>	1,238	1,480	0,657	0,858
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,354	0,634	0,375	0,613

Através da aplicação do método referente a um só extremo constatou-se que este apresenta, nos dois casos, um erro relativo ao local do defeito inferior a 1,480 % e um erro relativo ao comprimento da linha em estudo inferior a 0,634 %, quer isto dizer, que o defeito é localizado a 178 m de diferença do local exacto onde ocorreu.

Comparando os resultados obtidos para a linha simples, o método referente aos dois extremos apresenta resultados com um erro relativo inferior ao método referente a um só extremo, em maior parte dos testes feitos, para o mesmo local onde ocorreu o defeito. No entanto os resultados apresentados pelo método referente a um só extremo, apesar de apresentarem um maior erro, continuam a ser precisos e viáveis para a localização de defeitos ocorridas em linhas de transporte de energia.

Os resultados dos dois métodos para os restantes tipos de defeitos existentes estão expressos no anexo I, onde é possível verificar que os dois métodos apresentam sempre muito semelhantes aos resultados apresentados para o tipo de defeito DLT. Ambos os métodos são muito precisos independentemente do tipo de defeito que ocorra.

### 5.3 Linhas em Paralelo

Nas tabelas 5.9 e 5.10 são apresentados os resultados obtidos para os dois cenários usando o método referente aos dois extremos.

Tabela 5.9: Resultados obtidos através do método referente aos dois extremos para duas linhas em paralelo de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT

Geração - Geração				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,056	11,970	16,030	19,944
Erro relativo local (%)	0,702	0,247	0,185	0,281
Erro relativo comp. (%)	0,201	0,106	0,106	0,201

Tabela 5.10: Resultados obtidos através do método referente aos dois extremos para duas linhas em paralelo geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLT

Geração - Carga				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,056	11,970	16,030	19,944
Erro relativo local (%)	0,702	0,247	0,185	0,281
Erro relativo comp. (%)	0,201	0,106	0,106	0,201

Os resultados obtidos para os dois casos são iguais. Podemos também observar que os valores dos resultados apresentados nas tabelas para cada um dos erros são baixos, não sendo apresentado erros relativo ao local do defeito superiores a 0,702 % e erro relativo ao comprimento da linha em estudo de 0,201 %, correspondendo estes valores a uma diferença de 56 m do local exacto onde ocorreu o defeito.

A utilização do método referente a um só extremo está apresentada nas tabelas 5.11 e 5.12 onde podemos observar os resultados obtidos para os dois casos.

Tabela 5.11: Resultados obtidos através do método referente a um só extremo para duas linhas em paralelo de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLT

<b>Geração - Geração</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,994	11,618	15,678	20,027
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	3,181	2,016	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,022	1,363	1,152	0,095

Tabela 5.12: Resultados obtidos através do método referente a um só extremo para duas linhas em paralelo geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLT

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,994	11,618	15,678	20,027
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	3,181	2,016	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,022	1,363	1,152	0,095

À semelhança dos resultados obtidos para o método referente aos dois extremos, o método referente a um só extremo apresenta resultados iguais para os dois casos.

Comparando os resultados das tabelas 5.9 e 5.10 com os resultados das tabelas 5.11 e 5.12 podemos observar que o método referente aos dois extremos apresenta melhores resultados que o método referente a um só extremo. O método referente a um só extremo apresenta um erro relativo ao local do defeito inferior a 3,181 % e correspondente erro relativo ao comprimento da linha de 1,363 %, superior aos 0,702 % e 0,201 % apresentados pelo método referente aos dois extremos.

Embora os erros relativos apresentados nas tabelas do método referente a um só extremo sejam superiores aos apresentados nas restantes tabelas tanto para o cenário da linha simples como para o cenário das linhas paralelas esses erros traduzem-se numa diferença no máximo de 382 m do local exacto onde ocorreu o defeito.

Os resultados dos restantes tipos de defeitos que existem encontram-se no anexo II onde se observa que os resultados obtidos para os restantes tipos de defeitos é igual aos resultados obtidos para o defeito do tipo DLT.

## 5.4 Linhas em T

As tabelas 5.13 e 5.14 apresentam os resultados obtidos para o troço S-T, com defeitos do tipo DLT, aos 4 km e aos 10 km.

NA localização dos defeitos nesses dois locais, poderá ser utilizado tanto o troço S-R (28 km), que é composto pelos troços S-T (14 km) e T-R (14 km), como o troço S-K (24 km), que é composto pelos troços S-T (14 km) e T-K (10 km). Em ambos os troços considerados os defeitos ocorrem aos 4 km e aos 10 km, como é apresentado na figura 5.5.

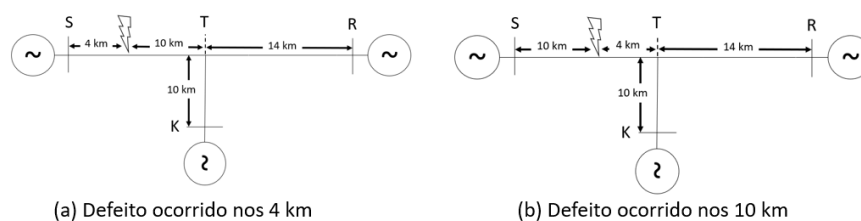


Figura 5.5: Defeito ocorridos no troço S-T

Tabela 5.13: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLT no troço S-T

Geração - Geração - Geração				
Visto do troço	S-R	S-K	S-R	S-K
Comprimento (km)	28	24	28	24
Local (km)	4	4	10	10
Obtido (km)	3,997	4,027	9,941	9,970
Erro relativo local (%)	0,075	0,665	0,592	0,296
Erro relativo comp. (%)	0,011	0,111	0,211	0,123

Tabela 5.14: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLT no troço S-T

Geração - Geração - Carga				
Visto do troço	S-R	S-K	S-R	S-K
Comprimento (km)	28	24	28	24
Local (km)	4	4	10	10
Obtido (km)	3,997	4,027	9,941	9,970
Erro relativo local (%)	0,075	0,665	0,592	0,296
Erro relativo comp. (%)	0,011	0,111	0,211	0,123

Os dois casos retratados nas tabelas 5.13 e 5.14 apresentam resultados iguais.

Através da aplicação do método OV nos dois extremos numa linha em T foi possível obter os resultados apresentados nas tabelas 5.15 e 5.16. Estas apresentam os resultados obtidos para o troço T-R, com defeitos do tipo DLT simulados aos 4 km e aos 10 km.

Para a localização dos defeitos nesses dois locais poderá ser utilizado tanto o troço S-R (28 km), que é composto pelos troços S-T (14 km) e T-R (14 km), como o troço K-R (24 km), que é composto pelos troços K-T (10 km) e T-R (14 km). No primeiro caso os defeitos simulados ocorrem aos 18 km e aos 24 km. Já no segundo caso os defeitos ocorrem aos 14 km e aos 20 km, como é apresentado na figura 5.6.

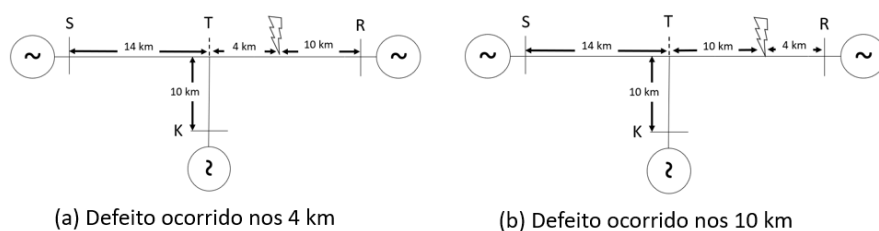


Figura 5.6: Defeito ocorridos no troço T-R

Tabela 5.15: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLT no troço T-R

Geração - Geração - Geração				
Visto do troço	S-R	K-R	S-R	K-R
Comprimento (km)	28	24	28	24
Local (km)	18	14	24	20
Obtido (km)	18,059	14,030	24,003	19,973
Erro relativo local (%)	0,329	0,211	0,013	0,133
Erro relativo comp. (%)	0,211	0,123	0,011	0,111

Tabela 5.16: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLT no troço T-R

Geração - Geração - Carga				
Visto do troço	S-R	K-R	S-R	K-R
Comprimento (km)	28	24	28	24
Local (km)	18	14	24	20
Obtido (km)	18,059	14,030	24,003	19,973
Erro relativo local (%)	0,329	0,211	0,013	0,133
Erro relativo comp. (%)	0,211	0,123	0,011	0,111

Os resultados obtidos para o troço S-T para os dois casos retratados nas tabelas 5.15 e 5.16 apresentam resultados iguais.

Através da aplicação do método OV num só extremo, cujos os resultados são apresentados nas tabelas 5.17 e 5.18, estes resultados são referentes ao troço K-T, com defeitos do tipo DLT localizados aos 4 km e aos 6 km.

Para a localização dos defeitos nesses dois locais poderá ser utilizado tanto o troço S-K (24 km), que é composto pelos troços S-T (14 km) e T-K (10 km), como o troço K-R (24 km), que é composto pelos troços K-T (10 km) e T-R (14 km). Os defeitos simulados no troço K-T aos 4 km e aos 6 km correspondem no troço S-K a defeitos ocorridos aos 18 km e 20 km, já no troço K-R representado aos 4 km e 6 km, como é apresentado na figura 5.7.

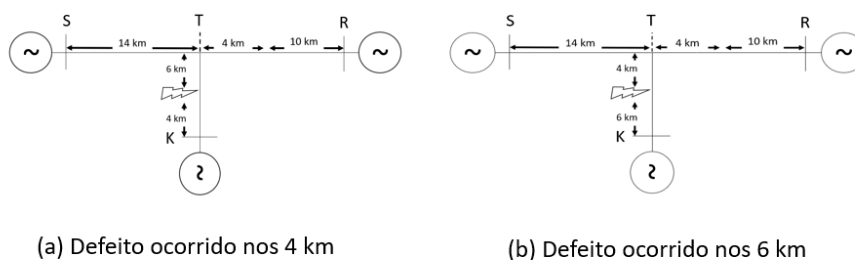


Figura 5.7: Defeito ocorridos no troço K-T

Tabela 5.17: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLT no troço K-T

Geração - Geração - Geração				
Visto do troço	S-K	K-R	S-K	K-R
Comprimento (km)	24	24	24	24
Local (km)	18	4	20	6
Obtido (km)	17,944	4,027	19,973	6,056
Erro relativo local (%)	0,312	0,665	0,133	0,936
Erro relativo comp. (%)	0,234	0,111	0,111	0,234

Tabela 5.18: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLT no troço K-T

Geração - Geração - Carga				
Visto do troço	S-K	K-R	S-K	K-R
Comprimento (km)	24	24	24	24
Local (km)	18	4	20	6
Obtido (km)	17,944	4,027	19,973	6,056
Erro relativo local (%)	0,312	0,665	0,133	0,936
Erro relativo comp. (%)	0,234	0,111	0,111	0,234

Independentemente da linha apresentar tripla geração ou dupla geração e uma carga o resultados são iguais.

Através da aplicação do método OV num só extremo, cujo os resultados estão expressos nas tabelas 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18, obtiveram-se resultados bastante precisos independentemente do troço onde ocorreu o defeito.

O erro relativo ao local do defeito apresentado é inferior a 0,936 % e respectivo erro relativo ao comprimento total do troço de 0,234 %, correspondendo estes valores à identificação do local de defeito a 56 m do local exacto onde esse defeito.

Os resultados dos restantes tipos de defeitos estão expressos no anexo III, onde podemos observar que independentemente do defeito simulado os resultados são iguais. Podemos então afirmar que os resultados apresentados pelo método são insensíveis ao tipo de defeitos.

## 5.5 Discussão

### 5.5.1 Linha Simples

Para o caso da linha simples tanto para o método referente aos dois extremos como para o método referente a um só extremo os resultados apresentados tem um elevado grau de precisão.

Sendo que para o método referente aos dois extremos a média do erro relativo ao local onde ocorreu o defeito é de 0,453 % e a média do erro relativo ao comprimento da linha é de 0,197 %.

Já para o método referente a um só extremo a média do erro relativo ao local onde ocorreu o defeito é de 0,790 % e a média de erro relativo ao comprimento da linha de é 0,411 %.

### 5.5.2 Linhas em Paralelo

Para o caso das linhas em paralelo, os resultados obtidos para o método referente aos dois extremos são bastante semelhantes aos resultados obtidos para a linha simples

um vez que os resultados apresentados apresenta uma média de erro relativo ao local do defeito de 0,504 % e uma média de erro relativo ao comprimento da linha de 0,225 %.

Já o método referente a um só extremo apresenta resultados com um erro relativo mais elevado que os resultados referentes à linha simples, tal como é possível observar a partir da média do erro relativo ao local do defeito que é de 1,351 % e pela média do erro relativo ao comprimento da linha que é de 0,658 %. Apesar dos erros relativo terem aumentado o método continua a ser preciso para este tipo de linha uma vez que no pior dos casos apresentou uma diferença de menos de 400 m relativamente ao local onde ocorreu o defeito.

### 5.5.3 Linha em T

Comparando os resultados obtidos do último e terceiro caso de estudo com os dois casos anteriores podemos verificar que os resultados para o método referente aos dois extremos são semelhantes relativamente ao erro relativo ao local onde ocorreu o defeito, uma vez que a sua média é de 0,361 % e também relativamente ao erro relativo ao comprimento da linha em estudo, apresentam uma média de 0,134 %.

Para o terceiro caso de estudo o método referente a um só extremo não tem modo de identificar em que troço ocorreu o defeito e assim proceder a sua localização.

Para linhas com mais que um troço como ocorre nas linha em T o método referente aos dois extremos é o método que deve ser escolhido, pois para além de conseguir identificar em que troço ocorreu o defeito a aplicação deste método usando uma frequência de amostragem considerável, e.g 1 MHz, obtem-se resultados com um erro relativo muito baixo, permitindo assim a identificação do local onde ocorreu o defeito com uma grande exactidão.

### 5.5.4 Comparação com a Literatura

Nos trabalhos [34] [27] [31], são apresentados resultados para o método OV num só extremo para um linha simples, apresentando um erro relativo inferior a 0,5 % o que valida os resultados obtidos para esse método, uma vez que as linhas testadas nesses casos tem dimensões bastante superiores à linha simples usada para o estudo neste documento.

Já para o método referente aos dois extremos no trabalho [5] são apresentados resultados com um erro inferior a 0,65 % para uma linha simples de 100 km com uma frequência de amostragem de 1 MHz, o que se enquadra nos resultados apresentados neste estudo, para esse método.

Os resultados típicos obtidos para uma linha simples nos métodos baseados na impedância, apresentam um erro superior aos resultados apresentados para os dois métodos OV apresentados neste documento. Como é o caso dos métodos baseados na impedância num só extremo que chega a apresentar erros relativos superiores a 10 %, em casos de defeitos que ocorram perto da extremidade oposta à qual obtém os dados para o algoritmo;



já para os métodos baseados na impedância nos dois extremos o erro associado é de de 1,2 % [18].

Comparando o método OV nos dois extremos com o método OV num só extremo, pode-se observar que o método referente aos dois extremos apresenta melhores resultados que o método referente a um só extremo, principalmente nas linhas em paralelo permitindo assim a identificação de defeitos em linha em T ao contrário do que acontece no método referente a um só extremo.

No entanto, o método referente aos dois extremos tem a desvantagem de ser mais dispendioso, uma vez que é necessários dois aparelhos de medição ao contrário do método referente a um só extremo que apenas necessita de um. É ainda necessário uma sincronização bastante elevada entre os dois aparelhos.



## CONCLUSÕES

### 6.1 Síntese do Trabalho

O aumento do número de linhas, faz com que exista um aumento do número de defeitos que poderão ocorrer pelo que é necessário que seja efectuada uma localização rápida e precisa dos locais onde estes ocorrem para que a linha seja posta de novo em serviço.

Inicialmente é necessário ter noção quais são os parâmetros distribuídos da linha, assim como de todas as equações matemáticas relativas ao modelo da linha. É necessária a compreensão da definição de defeito, assim como da tipologia de defeitos existentes e as consequências que esses possam provocar.

Ao longo dos anos foram sendo desenvolvidos vários métodos de localização de defeitos, podendo classificar-se em três tipos, os métodos baseados em fasores, os métodos baseados em altas frequências e os métodos baseados em OV. Os dois primeiros tipos de métodos apresentados, apresentam várias limitações, que são colmatadas através da utilização de métodos baseados em OV.

Ao longo das subsecções 3.1.1 e 3.1.2 são descritos detalhadamente os métodos OV nos dois extremos e referente a um só extremo, respectivamente. Através da descrição dos algoritmos utilizados para a implementação destes dois métodos podemos observar que o método OV num só extremo apresenta maior complexidade.

Através da aplicação dos dois métodos baseados em OV apresentados anteriormente foi elaborado um estudo da influência da frequência de amostragem na obtenção de resultados em duas linhas simples com dimensões diferentes (uma de 14 km e outra de 96.7 km). Deste estudo foi concluído que para os casos teste se iria considerar uma frequência de amostragem de 1 MHz.

Os dois sub-métodos baseados em OV foram testados para três linhas com tipologia

diferente. A primeira e segunda linha apresentada são referentes a uma linha simples e a duas linhas paralelas, respectivamente. Onde os resultados apresentados para ambos os métodos são bastante precisos. Já a terceira linha em estudo é uma linha em T, onde se verificou que a aplicação do método referente a um só extremo não era possível devido à impossibilidade de identificar previamente o troço onde ocorreu o defeito; já o método referente aos dois extremos apresentou resultados com elevado grau de precisão, tal como havia ocorrido nas restantes linhas em estudo.

### 6.2 Trabalhos Futuros

No estudo realizado os dados obtidos no método OV nos dois extremos são ideais relativamente ao sincronismo entre eles, isto é, estão os dois sincronizados de uma forma perfeita, no entanto tal não acontece na realidade, sendo que um apresenta um atraso relativamente ao outro. Este atraso introduz um erro à obtenção da estimativa do defeito. Como tal, será interessante a relação entre o tempo de sincronização e a precisão dos resultados.

Uma vez que no presente estudo as grandezas foram medidas por relés perfeitos, o estudo da influência dos erros de medida podem influenciar os resultados obtidos.

O estudo da influência da resistência de defeito e da resistência de terra nos resultados obtidos, uma vez que no presente estudo ambas as resistências são aproximadamente nulas.

Por último este estudo incide no desenvolvimento e análise dos métodos OV referente aos dois extremos e referente a um só extremo, e possível viabilidade dos mesmos, pelo que o desenvolvimento e análise dos métodos baseados na impedância nas mesmas condições e para os mesmos cenários permitiriam uma comparação directa entre os três métodos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Personal, A. García, A. Parejo, D. F. Larios, F. Biscarri e C. León. “A comparison of impedance-based fault location methods for power underground distribution systems”. Em: *Energies* 9.12 (2016). ISSN: 19961073. DOI: 10.3390/en9121022.
- [2] C. Ji. “Impedance-Based Fault Location Methods for Transmission Line”. Tese de mestrado. 2012.
- [3] E. O. Schweitzer. “A review of impedance-based fault locating experience,” em: *Northwest Electric Light & Power Association Conference*. April. 1988.
- [4] B. Kasztenny, A. Guzman, M. V. Mynam e T. Joshi. “Locating faults before the breaker opens - Adaptive autoreclosing based on the location of the fault”. Em: *71st Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2018* (2018). DOI: 10.1109/CPRE.2018.8349806.
- [5] G. Ma, L. Jiang, K. Zhou e G. Xu. “A method of line fault location based on traveling wave theory”. Em: *International Journal of Control and Automation* 9.2 (2016), pp. 261–270. ISSN: 20054297. DOI: 10.14257/ijca.2016.9.2.25.
- [6] H. Dommel. “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks”. Em: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* PAS-88.4 (2007), pp. 388–399. ISSN: 0018-9510. DOI: 10.1109/tpas.1969.292459.
- [7] V. Neves. *Electrotecnia Teórica - Linha de Transmissão*. Rel. téc. Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- [8] E. O. Schweitzer, A. Guzman, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny e S. Marx. “Locating faults by the traveling waves they launch”. Em: *2014 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2014* (2014), pp. 95–110. DOI: 10.1109/CPRE.2014.6798997.
- [9] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 448-13-02: "power system fault"*. 1995. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform{\&}ievref=448-13-02> (acedido em 20/01/2019).
- [10] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 448-13-06: "series fault"*

- . 1995. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform{\&ievref=448-13-06> (acedido em 21/01/2019).
- [11] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 448-13-05: "shunt fault"*. 1995. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform{\&ievref=448-13-05> (acedido em 21/01/2019).
- [12] S. S. Gururajapathy, H. Mokhlis e H. A. Illias. "Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review". Em: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74. February 2016 (2017), pp. 949–958. ISSN: 18790690. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.021. arXiv: NIHMS150003. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.021>.
- [13] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 448-13-07: "combination fault"*. 1995. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform{\&ievref=448-13-07> (acedido em 21/01/2019).
- [14] IEC 60050 - *International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEV number 448-13-09: "double-circuit fault"*. 1995. URL: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform{\&ievref=448-13-09> (acedido em 21/01/2019).
- [15] M. A. Baseer. "Travelling Waves for Finding the Fault Location in Transmission Lines". Em: *Journal Electrical and Electronic Engineering* 1.1 (2013), p. 1. ISSN: 2329-1613. DOI: 10.11648/j.jeee.20130101.11.
- [16] M. D. Fontaine, D. M. Green, J. C. Webb e P. A. Stoppello. "IEEE / ESW applying reliability centered maintenance (RCM) to electrical equipment critical to worker safety". Em: *IEEE IAS Electrical Safety Workshop* 1 (2013), pp. 105–112. ISSN: 2326330X. DOI: 10.1109/ESW.2013.6509010.
- [17] M. Mirzaei, M. Z.A. A. Kadir, E. Moazami e H. Hizam. "Review of Fault Location Methods for Distribution Power System". Em: *Australian Journal of Basic & Applied Sciences* 3.3 (2009), p. 2670.
- [18] S. Das, S. Santoso, A. Gaikwad e M. Patel. "Impedance-based fault location in transmission networks: Theory and application". Em: *IEEE Access* 2 (2014), pp. 537–557. ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2014.2323353.
- [19] T. Covington, T. Stankiewicz, R. Anderson, L. Wright e B. Cockerham. "A Simple Method for Determining Fault Location on Distribution Lines". Em: *Wprc 2017* August (2017).
- [20] P. Dutta, A. Esmaeilian e M. Kezunovic. "Transmission-line fault analysis using synchronized sampling". Em: *IEEE Transactions on Power Delivery* 29.2 (2014), pp. 942–950. ISSN: 08858977. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2296788.

- [21] A. Esmailian, T. Popovic e M. Kezunovic. "Transmission line relay mis-operation detection based on time-synchronized field data". Em: *Electric Power Systems Research* 125:February 2019 (2015), pp. 174–183. ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.04.008.
- [22] S. G. Mallat. "A theory for multiresolution using wavelet". Em: *SPIE application of digital image processing XIV* 1567.7 (1989), pp. 674–694. ISSN: 01628828. DOI: 10.1109/34.192463.
- [23] A. Guzman, B. Kasztenny, Y. Tong e M. V. Mynam. "Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications". Em: *71st Annual Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2018* 2018-January (2018), pp. 1–18. DOI: 10.1109/CPRE.2018.8349768.
- [24] B. Datta e S. Chatterjee. "A literature review on use of Bewley's lattice diagram". Em: *2012 1st International Conference on Power and Energy in NERIST, ICPEN 2012 - Proceedings* December (2012). DOI: 10.1109/ICPEN.2012.6492338.
- [25] SEL-T400L Proteção de linhas no domínio do tempo | Schweitzer Engineering Laboratories. URL: <https://selinc.com/pt/products/T400L/> (acedido em 12/02/2019).
- [26] SEL-411L Sistema avançado de proteção diferencial de linhas de transmissão com funções de automação, controle e localização de faltas por ondas viajantes (traveling waves) | Schweitzer Engineering Laboratories. URL: <https://selinc.com/pt/products/411L/> (acedido em 12/02/2019).
- [27] J. Chang. "Single Ended Traveling Wave Based Fault Location Using Discrete". Tese de mestrado. 2014.
- [28] V. S. Kale, S. R. Bhide e P. P. Bedekar. "Faulted Phase Selection Based on Wavelet Analysis of Traveling Waves". Em: *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 3.3 (2011), pp. 421–425. ISSN: 17938163. DOI: 10.7763/ijcee.2011.v3.354.
- [29] O. Altay, E. Gursoy e O. Kalenderli. "Single end travelling wave fault location on transmission systems using wavelet analysis". Em: *ICHVE 2014 - 2014 International Conference on High Voltage Engineering and Application* February (2014). DOI: 10.1109/ICHVE.2014.7035486.
- [30] I. The MathWorks. *Single-level 1-D discrete wavelet transform - MATLAB dwt*. URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/dwt.html> (acedido em 19/07/2019).
- [31] V. Kale, S. Bhide e P. Bedekar. "Fault Location Estimation based on Wavelet Analysis of Traveling Waves". Em: *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* (2012), pp. 1–5. DOI: 10.1109/APPEEC.2012.6307627.

- [32] B. Haihong e X. Qingshan. "Study of fault location for parallel transmissions lines using one terminal current traveling waves". Em: *3rd International Conference on Deregulation and Restructuring and Power Technologies, DRPT 2008* April (2008), pp. 2296–2301. DOI: 10.1109/DRPT.2008.4523794.
- [33] S. Xiujuan, L. Na e W. Pengfei. "Research on Fault Location of T-type Transmission Line Based on Wavelet Transform". Em: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 486 (2019), p. 012091. DOI: 10.1088/1757-899x/486/1/012091.
- [34] A. M. Elhaffar. "Power transmission line fault location based on current travelling waves". Tese de doutoramento. 2008. ISBN: 978-1-84919-834-9. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.10.026.
- [35] J. Sadeh, A. M. Ranjbar, N. Hadjsaid e R. Feuillet. "Accurate fault location algorithm for power transmission lines". Em: *European Transactions on Electrical Power* 10.5 (2000), pp. 313–318. ISSN: 1430144X.





## LINHA SIMPLES

- Método OV nos dois extremos
  - Defeito Linha-Linha-Terra (DLLT):

Tabela I.1: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT

Geração - Geração				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,056	11,970	16,030	19,944
Erro relativo local (%)	0,702	0,247	0,185	0,281
Erro relativo comp. (%)	0,201	0,106	0,106	0,201

Tabela I.2: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT

Geração - Carga				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,056	11,970	16,030	20,089
Erro relativo local (%)	0,703	0,247	0,185	0,444
Erro relativo comp. (%)	0,201	0,106	0,106	0,317

– Defeito Linha-Linha (DLL):

Tabela I.3: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL

Geração - Geração				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	7,911	11,970	16,030	20,089
Erro relativo local (%)	1,110	0,247	0,185	0,444
Erro relativo comp. (%)	0,317	0,106	0,106	0,317

Tabela I.4: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL

Geração - Carga				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	7,911	11,970	16,030	20,089
Erro relativo local (%)	1,110	0,247	0,185	0,444
Erro relativo comp. (%)	0,317	0,106	0,106	0,317

– Defeito Linha-Linha-Linha-Terra (DLLLLT):

Tabela I.5: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLLT

Geração - Geração				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	7,911	11,970	16,030	20,089
Erro relativo local (%)	1,110	0,247	0,185	0,444
Erro relativo comp. (%)	0,317	0,106	0,106	0,317

Tabela I.6: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Nos dois extremos</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,911	11,970	16,030	20,089
<b>Erro relativo local (%)</b>	1,110	0,247	0,185	0,444
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,317	0,106	0,106	0,317

- Método OV num só extremo

– Defeito Linha-Linha-Terra (DLLT):

Tabela I.7: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT

<b>Geração - Geração</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	8,046	12,178	16,185	20,006
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,574	1,480	1,155	0,030
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,164	0,634	0,660	0,022

Tabela I.8: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	8,046	12,178	15,874	20,006
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,574	1,480	0,785	0,030
<b>Erro relativo comp (%)</b>	0,164	0,634	0,449	0,022

– Defeito Linha-Linha (DLL):

Tabela I.9: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL

Geração - Geração				
Método	Num só extremo			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,046	12,178	15,874	20,006
Erro relativo local (%)	0,574	1,480	0,786	0,030
Erro relativo comp. (%)	0,164	0,634	0,448	0,022

Tabela I.10: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL

Geração - Carga				
Método	Num só extremo			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,046	12,178	15,874	20,006
Erro relativo local (%)	0,574	1,480	0,785	0,030
Erro relativo comp. (%)	0,164	0,634	0,449	0,022

– Defeito Linha-Linha-Linha-Terra (DLLLLT):

Tabela I.11: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLLT

Geração - Geração				
Método	Num só extremo			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,046	12,178	15,874	20,006
Erro relativo local (%)	0,574	1,480	0,786	0,030
Erro relativo comp. (%)	0,164	0,634	0,448	0,022

Tabela I.12: Resultados obtidos método referente a um só extremo para uma linha simples geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLLT

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	8,046	12,178	15,874	20,079
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,574	1,480	0,785	0,393
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,164	0,634	0,449	0,280



## LINHAS EM PARALELO

- Método OV nos dois extremos
  - Defeito Linha-Linha-Terra (DLLT):

Tabela II.1: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT

Geração - Geração				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,056	11,970	16,030	19,944
Erro relativo local (%)	0,702	0,247	0,185	0,281
Erro relativo comp. (%)	0,201	0,106	0,106	0,201

Tabela II.2: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT

Geração - Carga				
Método	Nos dois extremos			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	8,056	11,970	16,030	19,944
Erro relativo local (%)	0,702	0,247	0,185	0,281
Erro relativo comp. (%)	0,201	0,106	0,106	0,201

– Defeito Linha-Linha (DLL):

Tabela II.3: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL

<b>Geração - Geração</b>				
<b>Método</b>	<b>Nos dois extremos</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,911	11,970	16,030	20,089
<b>Erro relativo local (%)</b>	1,110	0,247	0,185	0,444
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,317	0,106	0,106	0,317

Tabela II.4: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Nos dois extremos</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	8,056	11,970	16,030	19,944
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,702	0,247	0,185	0,281
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,201	0,106	0,106	0,201

– Defeito Linha-Linha-Linha-Terra (DLLLLT):

Tabela II.5: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLLT

<b>Geração - Geração</b>				
<b>Método</b>	<b>Nos dois extremos</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	8,056	12,115	15,885	19,944
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,702	0,962	0,721	0,281
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,201	0,412	0,412	0,201



Tabela II.6: Resultados obtidos método referente aos dois extremos para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLLT

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Nos dois extremos</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	8,056	11,970	16,030	19,944
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,702	0,247	0,185	0,281
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,201	0,106	0,106	0,201

- Método OV num só extremo

– Defeito Linha-Linha-Terra (DLLT):

Tabela II.7: Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLT

<b>Geração - Geração</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,994	11,618	15,678	20,027
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	3,181	2,016	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,022	1,363	1,152	0,095

Tabela II.8: Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLT

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,994	11,618	15,678	20,027
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	3,181	2,016	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,022	1,363	1,152	0,095

– Defeito Linha-Linha (DLL):

Tabela II.9: Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLL

Geração - Geração				
Método	Num só extremo			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	7,994	11,618	15,678	20,027
Erro relativo local (%)	0,075	3,181	2,016	0,133
Erro relativo comp. (%)	0,022	1,363	1,152	0,095

Tabela II.10: Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLL

Geração - Carga				
Método	Num só extremo			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	7,994	11,618	15,678	20,027
Erro relativo local (%)	0,075	3,181	2,016	0,133
Erro relativo comp. (%)	0,022	1,363	1,152	0,095

– Defeito Linha-Linha-Linha Terra (DLLLLT):

Tabela II.11: Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas de dupla geração de 28 km para um defeito do tipo DLLLLT

Geração - Geração				
Método	Num só extremo			
Comprimento (km)	28			
Local (km)	8	12	16	20
Obtido (km)	7,994	11,618	15,678	20,027
Erro relativo local (%)	0,075	3,181	2,016	0,133
Erro relativo comp. (%)	0,022	1,363	1,152	0,095

Tabela II.12: Resultados obtidos método referente a um só extremo para duas linhas paralelas geração-carga de 28 km para um defeito do tipo DLLLT

<b>Geração - Carga</b>				
<b>Método</b>	<b>Num só extremo</b>			
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>			
<b>Local (km)</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	7,994	11,618	15,678	20,027
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	3,181	2,016	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,022	1,363	1,152	0,095





## LINHA EM T

- Defeito Linha-Linha-Terra (DLLT):

– Troço S-T:

Tabela III.1: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLT no troço S-T

Geração - Geração - Geração				
Visto do troço	S-R	S-K	S-R	S-K
Comprimento (km)	28	24	28	24
Local (km)	4	4	10	10
Obtido (km)	3,997	4,027	9,941	9,970
Erro relativo local (%)	0,075	0,665	0,592	0,296
Erro relativo comp. (%)	0,011	0,111	0,211	0,123

Tabela III.2: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLT no troço S-T

Geração - Geração - Carga				
Visto do troço	S-R	S-K	S-R	S-K
Comprimento (km)	28	24	28	24
Local (km)	4	4	10	10
Obtido (km)	3,997	4,027	9,941	9,970
Erro relativo local (%)	0,075	0,665	0,592	0,296
Erro relativo comp. (%)	0,011	0,111	0,211	0,123

– Troço T-R:

Tabela III.3: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLT no troço T-R

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	18,059	14,030	24,003	19,973
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,329	0,211	0,013	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,211	0,123	0,011	0,111

Tabela III.4: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLT no troço T-R

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	18,059	14,030	24,003	19,973
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,329	0,211	0,013	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,211	0,123	0,011	0,111

– Troço K-T:

Tabela III.5: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLLT no troço K-T

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>6</b>
<b>Obtido (km)</b>	17,944	4,027	19,973	6,056
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,312	0,665	0,133	0,936
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,234	0,111	0,111	0,234

Tabela III.6: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLT no troço K-T

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	24	24	24	24
<b>Local (km)</b>	18	4	20	6
<b>Obtido (km)</b>	17,944	4,027	19,973	6,056
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,312	0,665	0,133	0,936
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,234	0,111	0,111	0,234

- Defeito Linha-Linha (DLL):

– Troço S-T:

Tabela III.7: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLL no troço S-T

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>
<b>Comprimento (km)</b>	28	24	28	24
<b>Local (km)</b>	4	4	10	10
<b>Obtido (km)</b>	3,997	4,027	9,941	9,970
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	0,665	0,592	0,296
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,011	0,111	0,211	0,123

Tabela III.8: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLL no troço S-T

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>
<b>Comprimento (km)</b>	28	24	28	24
<b>Local (km)</b>	4	4	10	10
<b>Obtido (km)</b>	3,997	4,027	9,941	9,970
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	0,665	0,592	0,296
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,011	0,111	0,211	0,123

– Troço T-R:

Tabela III.9: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLL no troço T-R

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	18,059	14,030	24,003	19,973
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,329	0,211	0,013	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,211	0,123	0,011	0,111

Tabela III.10: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLL no troço T-R

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	18,059	14,030	24,003	19,973
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,329	0,211	0,013	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,211	0,123	0,011	0,111

– Troço K-T:

Tabela III.11: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLL no troço K-T

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>6</b>
<b>Obtido (km)</b>	17,944	4,027	19,973	6,056
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,312	0,665	0,133	0,936
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,234	0,111	0,111	0,234



Tabela III.12: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLL no troço K-T

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	24	24	24	24
<b>Local (km)</b>	18	4	20	6
<b>Obtido (km)</b>	17,944	4,027	19,973	6,056
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,312	0,665	0,133	0,936
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,234	0,111	0,111	0,234

- Defeito Linha-Linha-Linha-Terra (DLLLLT):

– Troço S-T:

Tabela III.13: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLLLT no troço S-T

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>
<b>Comprimento (km)</b>	28	24	28	24
<b>Local (km)</b>	4	4	10	10
<b>Obtido (km)</b>	3,997	4,027	9,941	9,970
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	0,665	0,592	0,296
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,011	0,111	0,211	0,123

Tabela III.14: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLLLT no troço S-T

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>	<b>S-R</b>	<b>S-K</b>
<b>Comprimento (km)</b>	28	24	28	24
<b>Local (km)</b>	4	4	10	10
<b>Obtido (km)</b>	3,997	4,027	9,941	9,970
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,075	0,665	0,592	0,296
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,011	0,111	0,211	0,123

– Troço T-R:

Tabela III.15: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração um defeito do tipo DLLLT no troço T-R

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	18,059	14,030	24,003	19,973
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,329	0,211	0,013	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,211	0,123	0,011	0,111

Tabela III.16: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLLT no troço T-R

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>	<b>S-R</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>14</b>	<b>24</b>	<b>20</b>
<b>Obtido (km)</b>	18,059	14,030	24,003	19,973
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,329	0,211	0,013	0,133
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,211	0,123	0,011	0,111

– Troço K-T:

Tabela III.17: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de tripla geração de um defeito do tipo DLLLT no troço K-T

<b>Geração - Geração - Geração</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>6</b>
<b>Obtido (km)</b>	17,944	4,027	19,973	6,056
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,312	0,665	0,133	0,936
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,234	0,111	0,111	0,234

Tabela III.18: Resultados obtidos numa simulação de uma linha em T de dupla geração e uma carga de um defeito do tipo DLLLT no troço K-T

<b>Geração - Geração - Carga</b>				
<b>Visto do troço</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>	<b>S-K</b>	<b>K-R</b>
<b>Comprimento (km)</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>	<b>24</b>
<b>Local (km)</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>6</b>
<b>Obtido (km)</b>	17,944	4,027	19,973	6,056
<b>Erro relativo local (%)</b>	0,312	0,665	0,133	0,936
<b>Erro relativo comp. (%)</b>	0,234	0,111	0,111	0,234